

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## **ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE SYNCHRONNÍHO STROJE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

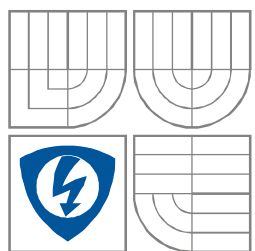
Tomáš Volf

BRNO 2008



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE SYNCHRONNÍHO STROJE**

**MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF SYNCHRONOUS MACHINE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Volf**

**VEDOUcí PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Miroslav Skalka**

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Volf Tomáš

**Ročník:** 3

**ID:** 83141

**Akademický rok:** 2007/08

**NÁZEV TÉMATU:**

**Analýza magnetického pole synchronního stroje**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s programem pro analýzu magnetického pole u synchronních strojů v příčném řezu.
2. Modifikujte stávající program pro použití jiných typů profilových vodičů.
3. Posuďte provedenou modifikaci z hlediska využitelnosti.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 10.10.2007

**Termín odevzdání:** 06.06.2008

**Vedoucí práce:** Ing. Miroslav Skalka

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení:

Bytem:

Narozen/a (datum a místo):

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

☐ disertační práce

☐ diplomová práce

☒ bakalářská práce

☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:

Vedoucí/ školitel VŠKP:

Ústav:

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v \*:

☒ tištěné formě – počet exemplářů 1

☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

---

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **Abstrakt**

Projekt Analýza magnetického pole synchronního stroje se zabývá programem pro analýzu magnetického pole u synchronních strojů v příčném řezu. Tento program je zde podrobněji popsán spolu s nezbytnou teorií synchronního generátoru a programu ANSYS. Dále je zde provedena modifikace programu pro použití jiných typů profilových vodičů – konkrétně vodičů kruhových.

Tohoto je dosaženo numerickou výpočetní metodou – Metodou konečných prvků. K vytvoření simulace magnetického pole slouží program ANSYS, který Metodu konečných prvků při výpočtech používá.

## **Abstract**

The Magnetic Field Analysis Project of Synchronous Machine deals with program for magnetic field analysis of synchronous machine cross section. This program is written in detail along with the necessary theory of synchronous machine and the ANSYS program. After this the program for using different types of sectional wires modification is made – in the concrete for round conductors.

It is attained the numeric computing method – The Finite Element Method. To creation of the magnetic field simulation serves ANSYS program, which uses The Finite Element Method.

## **Klíčová slova**

synchronní stroj; magnetické pole; analýza; generátor; stator; rotor; metoda konečných prvků; makro; vinutí; uzel; element; MESHování; okrajové podmínky; stupeň volnosti

## **Keywords**

synchronous machine; magnetic field; analysis; generator; stator; rotary; the finite element method; macro; winding; node; element; MESHing; boundary conditions; degree of freedom

## **Bibliografická citace**

VOLF, T. *Analýza magnetického pole synchronního stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Skalka.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Analýza magnetického pole synchronního stroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

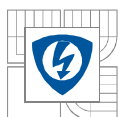
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ..... Podpis autora .....

## **Poděkování**

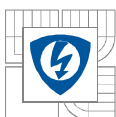
Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Skalkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne ..... Podpis autora .....

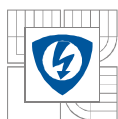


## OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2 REŠERŠE DANÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 SYNCHRONNÍ STROJE.....</b>	<b>16</b>
2.1.1 HISTORIE.....	16
2.1.2 SYNCHRONNÍ GENERÁTOR - ALTERNÁTOR .....	17
2.1.3 OBVODOVÝ MODEL.....	18
<b>2.2 DRUHY VODIČŮ .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 TYPY VINUTÍ .....	20
2.2.2 POČET VRSTEV VINUTÍ, ČÁSTI VINUTÍ.....	21
<b>2.3 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V SYNCHRONNÍCH STROJÍCH.....</b>	<b>22</b>
2.3.1 MATERIÁLY PRO MAGNETICKÉ OBVODY .....	22
2.3.2 MATERIÁLY PRO VODIČE .....	23
2.3.3 IZOLAČNÍ MATERIÁLY.....	23
<b>3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ A PROGRAM ANSYS .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 NUMERICKÉ METODY ŘEŠENÍ .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 VÝVOJOVÉ TRENDY ELEKTROMAGNETICKÉ ANALÝZY.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 POPIS POUŽÍVANÝCH NUMERICKÝCH METOD.....</b>	<b>27</b>
3.3.1 METODA KONEČNÝCH DIFERENCÍ (MKD, <i>THE FINITE DIFFERENCE METHOD</i> ).....	27
3.3.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP, <i>THE FINITE ELEMENT METHOD</i> ).....	27
3.3.3 METODA HRANIČNÍCH PRVKŮ (MHP, <i>THE BOUNDARY ELEMENT METHOD</i> ).....	27
<b>3.4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP, <i>THE FINITE ELEMENT METHOD</i>) .....</b>	<b>28</b>
<b>3.5 ANSYS.....</b>	<b>29</b>
3.5.1 TYPY ANALÝZY.....	29
3.5.2 FÁZE ANALÝZY .....	30
3.5.3 DŮLEŽITÉ POJMY .....	31
3.5.4 STUPNĚ VOLNOSTI ( <i>DEGRESE OF FREEDOM</i> ) .....	32
3.5.5 TYPY SOUBORŮ ANSYSU.....	33
<b>4 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE SYNCHRONNÍHO STROJE.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 MAKRA .....</b>	<b>33</b>
4.1.1 DEFINICE MAKRA - OBECNĚ .....	33
4.1.2 MAKRA V ANSYSU.....	33
4.1.3 APDL.....	34
<b>4.2 ELEMENTY POUŽÍVANÉ V PROGRAMU.....</b>	<b>34</b>
<b>5 PARAMETRY STROJE .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 ZADANÉ PARAMETRY.....</b>	<b>35</b>
5.1.1 DRÁŽKA STATORU .....	37
<b>5.2 VYPOČÍтанÉ PARAMETRY .....</b>	<b>39</b>
5.2.1 VÝPOČET ROZMĚRŮ PRO DRÁŽKU PRO VODIČE KRUHOVÉHO PRŮŘEZU .....	40
<b>5.3 B-H CHARAKTERISTIKA DRÁŽKOVÉHU KLÍNU .....</b>	<b>41</b>



<b>6 VYTVOŘENÍ PARAMETRICKÉHO MODELU .....</b>	<b>41</b>
<b>6.1 MODULY PROGRAMU .....</b>	<b>42</b>
6.1.1 MODUL PREPROCESSING .....	42
6.1.2 MODUL SOLUTION .....	43
6.1.3 MODUL POSTPROCESSING .....	43
<b>6.2 PRÁCE S PARAMETRICKÝM MODELEM – PROFILOVÉ VINUTÍ .....</b>	<b>43</b>
6.2.1 MAKRO INPUTDATA.MAC .....	43
6.2.2 MAKRO MODELING&MESHING1.MAC .....	44
6.2.3 MAKRO MODELING&MESHING2.MAC .....	46
6.2.4 MAKRO WINDING.MAC .....	48
6.2.5 MAKRO RUN.MAC .....	49
<b>7 OBMĚNA PROGRAMU – KRUHOVÉ VINUTÍ.....</b>	<b>52</b>
<b>7.1 TVAR DRÁŽKY .....</b>	<b>52</b>
<b>7.2 ČINITEL PLNĚNÍ DRÁŽKY .....</b>	<b>53</b>
<b>7.3 PARAMETRICKÝ MODEL .....</b>	<b>54</b>
7.3.1 MAKRO INPUTDATA.MAC .....	54
7.3.2 MAKRO MODELING&MESHING1.MAC .....	54
<b>7.4 POROVNÁNÍ VERZÍ PROGRAMU.....</b>	<b>55</b>
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>59</b>

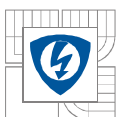


## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Rotor stroje; a) stroj s vyniklými póly, b) stroj s hladkým rotorem .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2: Obvodový model alternátoru.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3: Vsypávané vinutí – navinuté na cívkách.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4: Profilové vinutí – navinuté na cívce .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5: Profilové vinutí.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 6: Závislost vnějšího průměru cívky na hmotnosti.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7: Izolační vrstvy.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8: Izolační pásy.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 9: Rozdělení objektu na elementy .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10: Rozdíl mezi technickým systémem a aproximací konečnými prvky .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 11: Program ANSYS.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 12: Princip řešení pomocí numerických metod.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 13: Stupně volnosti .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 14: Předávání informací mezi elementy.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 15: Element PLANE13 .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 16: Element PLANE53 .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 17: Element CIRCU124.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 18: Zadané parametry.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 19: Zadané parametry – detail drážky statoru .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 20 B-H křivka .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 21: Stav ke konci makra .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 22: MESH statoru.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 23: MESH stroje.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 24: MESH – detail pólu .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 25: Zapojení vinutí.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 26: Průběh siločar .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 27: Průběh siločar – detail pólu.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 28: Magnetická indukce .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 29: Magnetická indukce – detail pólu.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 30: Magnetická indukce – detail vzduchové mezery .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 31: Tvary drážek .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 32: Stav ke konci makra .....</i>	<i>54</i>

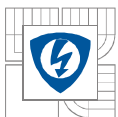


<i>Obr. 33: MESH statoru.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 34: Statorové drážky – profilové vinutí .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 35: Statorové drážky – vsypávané vinutí .....</i>	<i>57</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Izolační materiály .....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2: Typy a přípony souborů ANSYSu .....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 3: Zadané parametry.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 4: Hodnoty pro vinutí obdélníkového průřezu .....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5: Hodnoty pro vinutí kruhového průřezu .....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6: Vypočítané parametry .....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7: Nastavení dělení pro MESH .....</i>	<i>47</i>



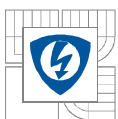
# 1 ÚVOD

Úkolem bakalářské práce je prostudování programu pro analýzu magnetického pole u synchronních strojů v příčném řezu. K pochopení programu je zapotřebí poznat metodu konečných prvků – numerickou metodu řešení – a především program ANSYS, v jehož prostředí se veškeré výpočty odehrávají. Ke stanovení magnetického pole je třeba rozumět problematice zvoleného stroje.

Ohledně synchronního stroje se budeme zabývat historickým vývojem v oblasti elektrotechniky až do vyrobení prvního synchronního stroje. U toho pak bude vysvětlena jeho funkce a princip.

V kapitole o metodě konečných prvků se zaměříme na vývojové trendy řešení problematiky, na rozdělení numerických metod a především na Metodu konečných prvků. Dále nás bude zajímat program ANSYS, především typy a postupy analýzy, důležité pojmy a často používané elementy.

V další kapitole budeme zkoumat program vytvořený Erikem Odvářkou a provádět jeho modifikaci pro použití jiných typů profilových vodičů. Vytvoříme geometrický model synchronního generátoru, pohlédneme na jeho zatížení, charakteristiky, porovnáme stroje s oběma typy vinutí, což bude uvedeno v závěru.



## 2 REŠERŠE DANÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Synchronní stroje

#### 2.1.1 Historie

Už ve středověku byly pozorovány elektrostatické jevy, v 18. století byly známy některé zákony elektrostatiky, páni *Luigi Galvani* (1737 – 1798; student teologie a medicíny; sepsal Traktát o elektrických silách při pohybu svalů) a *Alessandro Giuseppe Volta* (1745 – 1827; objevitel metanu; sestrojil pistoli, ze které se střílelo pomocí jisker statické elektřiny; je po něm pojmenována jednotka elektrického napětí respektive el. potenciálu) vynalezli první účinné zdroje elektrické energie – galvanické články.

Těchto výsledků využil *Vasilij Vladimirovič Petrov* (1761 - 1834; Василий Владимирович Петров) a roku 1802 sestrojil silnou baterii galvanických článků a objevil elektrický oblouk.

O osmnáct let později přistrčil během přednášky na univerzitě v Kodani profesor *Hans Christian Oersted* (1777 - 1851) kompas do blízkosti drátu pod elektrickým proudem a střílka se odchýlila od původního směru, poznal tedy, že je souvislost mezi elektřinou a magnetismem, a napsal spis o působení elektrického konfliktu. Za své zásluhy byl odměněn zámekem. A tak vznikl nový obor fyziky – elektromagnetismus.

Mezitím poznal *André Marie Ampère* (1775 – 1836; na jeho počest je pojmenována jednotka elektrického proudu a Ampérovo pravidlo pravé ruky) síly působící v magnetickém poli na vodiče, jimiž prochází proud.

Ampérovy poznatky využil anglický fyzik *Michael Faraday* (1791 – 1867; do svých 22 let knihařský dělník) a 29.8.1831 objevil elektromagnetickou indukci a tím dal základ ke konstrukci generátorů přeměňujících mechanickou energii na elektrickou. Sestrojil první elektromotor na světě, tzv. homopolární motor. Tento motor se sice točil, avšak nevykonával téměř žádnou práci.

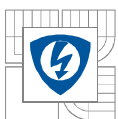
Dalším fyzikem byl Američan *Joseph Henry* (1797 – 1878; vynálezce elektromagnetického relé a následně elektromagnetického telegrafu; jeho jméno je názvem jednotky indukčnosti), který sestrojil v roce 1831 první elektromotor schopný něco pohánět. Následující rok objevil jev známý jako vzájemná indukčnost (na jeho počest je jednotka indukčnosti pojmenovaná henry).

Obecný zákon o elektromagnetické indukci formuloval roku 1834 *Heinrich Friedrich Emil Lenz* (1804 – 1865; podle různých pramenů buďto ruský akademik nebo německý fyzik) a v tutéž dobu ruský profesor *Moritz Hermann von Jacobi* (1801 – 1874) postavil první elektromotor o výkonu zhruba 0,5 kW a 15.září 1836 s ním proháněl člun s dvanácti osobami po řece Něvě.

Magnetismus a elektřina poskytovaly nadále spoustu témat ke zkoumání. V padesátých letech 19. století se již stavěly generátory s permanentními magnety, které napájely obloukovky v majácích.

Aby umožnil vyrábět generátory bez permanentních magnetů, studoval a roku 1866 definoval *Ernst Werner von Siemens* (1816 – 1892; vynálezce dynama roku 1866, je po něm pojmenována jednotka elektrické vodivosti a firma zabývající se výrobou elektrických strojů) dynamoelektrický princip.





Hlavní zastánce stejnosměrného proudu (viz dále) *Thomas Alva Edison* (1847 – 1931; americký vynálezce – více jak 1000 patentů; postavil 121 elektráren; autor následujících výroků: „Vynález je jen 1 % inspirace a 99 % dřiny. Spát lze čtyři hodiny denně, spát déle je nemístný přepych. Na léčení trápení je práce lepší než láhev whisky.“) sestrojil roku 1879 dynamo poháněné přímo parním strojem.

Objevitel točivého magnetického pole *Nikola Tesla* (1856 – 1943; podle něj je nazvána jednotka magnetické indukce) zkonstruoval roku 1887 jednoduchý a levný asynchronní motor. Společně s *Georgem Westinghousem* (1846 - 1914) šířil ideu střídavého proudu.

Lišící se názory na používání elektrického proudu vedly k rozepři, návrháři Edison a Tesla zastávali dva odlišné názory – Edison podporoval proud stejnosměrný a Tesla střídavý. Pro své vlastnosti vyhrál proud střídavý, a protože propagátoři obou možností byli lidé rozumní a nikoli choleričtí, oba spor přežili.

A konečně výhody střídavého proudu ocenil i *Pavel Nikolajevič Jabločkov* (1847 – 1894; Павел Николаевич Яблочков; vynalezl první elektrický zdroj světla – obloukovou lampu nazývanou též Jabločkovovou nebo ruskou svíčkou) a sestrojil první střídavý generátor.

### 2.1.2 Synchronní generátor - alternátor

Už název *synchronní* naznačuje, že rotor stroje připojeného k síti s kmitočtem  $f$  se otáčí stále stejnými *synchronními* otáčkami  $n_s$ , a to jak u synchronních generátorů (neboli alternátorů), tak u synchronních motorů.

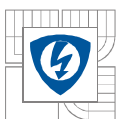
Elektrickou energii je možné čerpat z energie mechanické, která se získává z energie tepelné, případně z energie proudící vody nebo vzduchu. Tak se děje pomocí stejnosměrných dynam, asynchronních generátorů (při konverzi větrné energie, v některých malých vodních elektrárnách) nebo generátorů synchronních – alternátorů. Výhoda alternátorů spočívá v tom, že elektrická energie vzniká ve statoru. Energie tedy nejde přes žádná sběrací zařízení (komutátor, kartáče), jak je tomu u stejnosměrným strojů. Proto lze stavět alternátory přímo na vysoké napětí a na daleko větší výkony, než je tomu u strojů stejnosměrných.

Stroj se skládá z nepohyblivé části (statoru) a části pohyblivé (rotoru). Na statoru je umístěno stejné trojfázové vinutí jako u asynchronního stroje, které napájí systém. Vinutí budicí (napájené přes dva kartáče a dva kroužky stejnosměrným proudem) se umísťuje na rotor a vytváří potřebné magnetické pole. Rotor se otáčí se stejnou rychlostí, jakou bude mít točivé magnetické pole statoru. Energie potřebná k buzení je oproti energii, jež se odvádí ze statoru, nepatrná. Často se buzení odebírá z vlastního budiče, tedy dynama, jehož rotor je spojený s hřídelí synchronního stroje. Otáčením rotoru se ve statoru vytváří periodicky proměnné magnetické pole, jehož účinkem se ve statorovém vinutí indukuje napětí o kmitočtu přímo úměrnému otáčkám.

Efektivní hodnotu indukovaného napětí  $U_n$  jedné fáze dává vztah

$$U_n = \frac{2\pi \cdot \Phi_M \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot \Phi_M \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \quad [\text{V}], \quad (1)$$

kde  $N_1$  je počet závitů jedné fáze spojené v sérii,  $k_{v1}$  je činitel vinutí kotvy,  $f$  je kmitočet [Hz] a  $\Phi_M$  je maximální hodnota magnetického toku prostupujícího vzduchovou mezerou.



Úhlový kmitočet  $\omega$  udává následující rovnice:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad [\text{rad/s}], \quad (2)$$

kde  $T$  je perioda [s] a  $n$  jsou otáčky za minutu [ot/min].

Kmitočet  $f$  lze vypočítat následujícím způsobem:

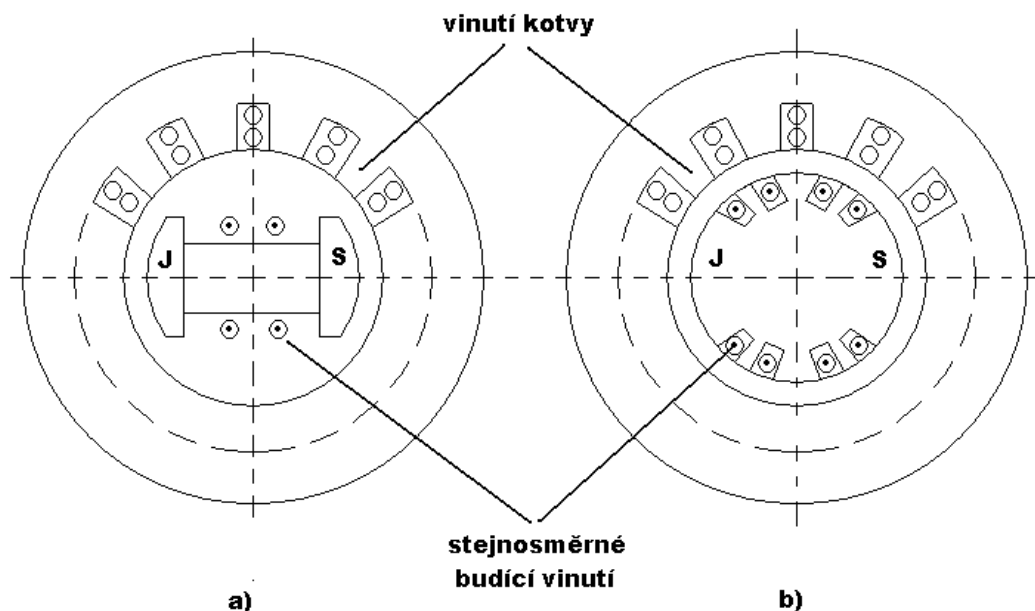
$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad [\text{Hz}], \quad (3)$$

kde  $p$  je počet pólových dvojic vinutí statoru

Pohon alternátoru zajišťuje primární mechanické zařízení (turbína, dieselaagregát), které je vybaveno regulátorem, jenž řídí jeho rychlost v závislosti na nastavené kmitočtové charakteristice. Energie vyrobená generátorem se do sítě dodává přes zvyšovací transformátor. Mezi další důležité prvky patří budič, napěťový regulátor, měřicí, ovládací a pomocná zařízení.

V konstrukci není rozdíl mezi synchronním generátorem a synchronním motorem. Každý takový stroj může být generátorem i motorem. Toho se využívá např. v přečerpávacích elektrárnách, kde synchronní stroj pohání v noci čerpadla pro přečerpávání vody z dolní nádrže do horní a v době energetické špičky je tento stroj poháněn vodní turbínou a dodává tak elektrickou energii do elektrické sítě.

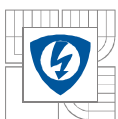
Existují dva typy synchronních strojů, bráno z konstrukčního hlediska: stroj s vyniklými póly - Obr. 1 a) a stroj s hladkým rotorem - Obr. 1 b).



Obr. 1: Rotor stroje; a) stroj s vyniklými póly, b) stroj s hladkým rotorem

### 2.1.3 Obvodový model

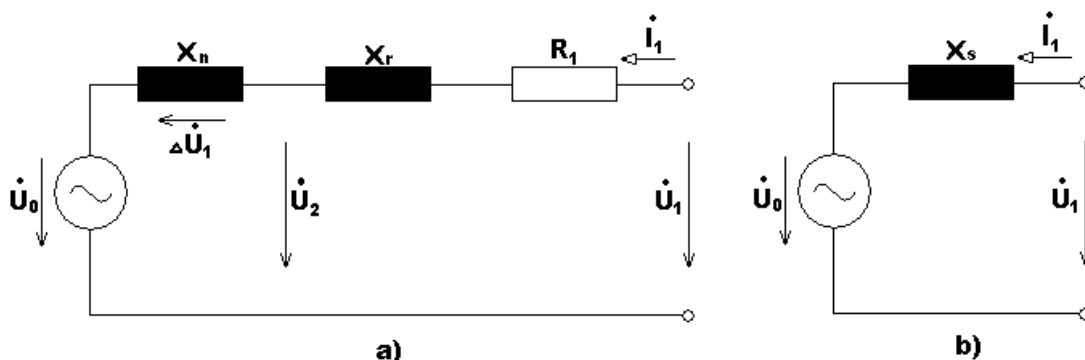
Jedná se o jednoduchý model, který nám pomůže pochopit chování stroje. Magnetický tok kotvy  $\Phi_1$  a magnetický tok budící  $\Phi_2$  se skládají ve výsledný magnetický tok ve vzduchové mezeře  $\Phi_v$  ( $\Phi_v = \Phi_1 + \Phi_2$ ). Společně pak indukují ve vinutí kotvy napětí  $U_i$ , které je dáno



součtem napětí  $U_0$  indukovaného budícím tokem  $\Phi_2$  a napětím  $\Delta U_I$  indukovaného reaktančním tokem  $\Phi_I$ . Magnetický tok  $\Phi_I$  je ve fázi s proudem kotvy  $I_I$ , takže  $\Delta U_I$  předbíhá proud  $I_I$  o  $90^\circ$ .

$$U_i = U_0 + \Delta U_I = U_0 + jX_n I_I \quad [\text{V}], \quad (4)$$

kde  $X_n$  je hlavní (magnetizační) reaktance vinutí kotvy stroje  $[\Omega]$ .



Obr. 2: Obvodový model alternátoru

Vnitřní indukované napětí  $U_i$  se liší od svorkového napětí  $U_I$  úbytkem na rozptylové reaktanci  $X_r$  vinutí kotvy a úbytkem na ohmickém odporu  $R_l$  vinutí kotvy (Obr. 2 a)). Abychom obvodový model zjednodušili, upravíme jej následujícím způsobem (Obr. 2 b)): Reaktance  $X_n$  a  $X_r$  nahradíme celkovou synchronní reaktancí stroje  $X_s$ . Zanedbáme úbytek napětí na ohmickém odporu  $R_l$ , neboť je daleko menší jak úbytek napětí na reaktanci  $X_s$ .

## 2.2 Druhy vodičů

Vinutí elektrických strojů tvoří důležitou část všech elektrických strojů. Lze je dělit podle následujících kritérií:

- způsob vkládání
  - axiální – ve směru osy
  - radiální – ve směru poloměru, paprskovitě
- typ vinutí
  - kruhový – vsypávané vinutí
  - profilový – obdélníkového průřezu
  - tyčová
- počet vrstev vinutí
  - jednovrstvé
  - dvouvrstvé
- krok cívk
  - soustředné vinutí
  - vinutí stejných cívek



### 2.2.1 Typy vinutí

Podle konstrukce se střídavá vinutí dělí na vinutí vsypávaná s měkkými cívkami, vinutí s polotuhými a tuhými cívkami a tyčová vinutí.

#### Kruhové – vsypávané vinutí

U strojů do napětí 1 kV se používají kruhové vodiče zhruba do průměru 2 mm (Obr. 3). Náklady na výrobu vinutí s použitím kruhových vodičů jsou menší, avšak využitelnost drážky je nižší navíc s nedefinovaným napětím mezi závity.



*Obr. 3: Vsypávané vinutí – navinuté na cívkách*

Vsypávané vinutí se ukládá do polozavřených drážek s úzkým otevřením, kterým se postupně jednotlivé vodiče zavádějí („vsypávají“) do srážky (odtud je odvozen název vinutí).

Největší průměr drátu používaný u vsypávaných vinutí zpravidla nepřevyšuje 1,8 mm, neboť vodiče většího průměru jsou příliš tuhé, špatně se upevňují v drážkách a činitel plnění drážky není příliš velký. Potřebného průřezu vodiče se dosahuje použitím několika dílčích paralelních vodičů.

Při návrhu strojů se pro snížení počtu paralelních vodičů volí vinutí s několika paralelními větvemi.

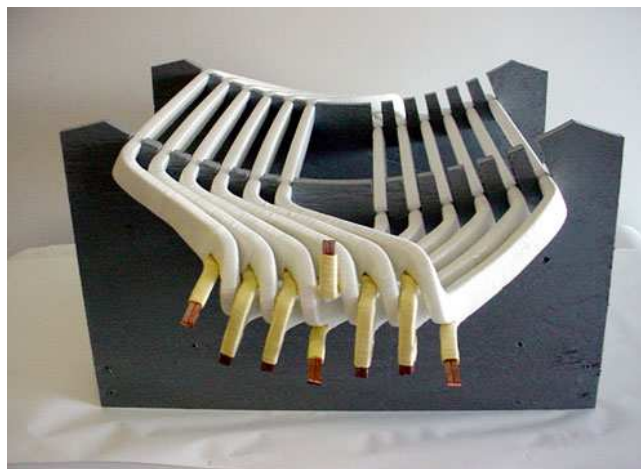
#### Profilové – obdélníkového průřezu

Pro stroje se jmenovitým napětím větším než 1 kV se používá profilových vodičů (Obr. 4 – zde namotané na cívce, Obr. 5 – připravené ke vložení do drážek). Vinutí z profilových drátů prochází složitějšími technologickými operacemi než vinutí sestavené z kruhových drátů, ale je zde dosaženo většího využití drážky s přesně definovaným napětím mezi závity.



*Obr. 4: Profilové vinutí – navinuté na cívce*

Ve strojích o výkonech větších než 100 kW se z důvodu zvýšení mechanické pevnosti vyrábějí cívky z vodiče s pavoúhlým průřezem (z pásu). Cívky se navíjejí na tvarovacích šablonách a ještě před uložením do drážek se jim dává konečný tvar a úprava.



Obr. 5: *Profilové vinutí*

Jestliže jmenovité napětí stroje o výkonu do 100 kW dosahuje vyšších hodnot a na izolaci nejsou kladeny zvláštní požadavky, je možné použít *polotuhé cívky*. Tyto cívky se rovněž navíjejí na tvarovacích šablonách do konečného tvaru, ale cívková izolace je podobného typu jako izolace u vsypávaných vinutí, tedy izolují se nikoli cívky, ale drážky.

Vinutí z *tuhých cívek* se používají ve všech strojích s napětím 3 kV a vyšším nebo ve strojích, na něž jsou kladeny zvláštní požadavky.

#### **Tyčová vinutí**

Určujícím prvkem tyčového vinutí není cívk, jako tomu bylo u předchozích typů vinutí, ale tyč, jež vlastně představuje polovinu cívky. Tyče se ukládají do drážek postupně a až po založení se navzájem spojují, čímž vytvářejí závit vinutí.

#### **2.2.2 Počet vrstev vinutí, části vinutí**

Základní částí vinutí stroje je *závit*. Několik závitů, které jsou zapojeny do série a umístěny ve stejných drážkách opatřených společnou celkovou izolací, tvoří *cívk* vinutí. Každá *aktivní strana* cívky je umístěna v jedné drážce. Jestliže je celá drážka zaplněna aktivní stranou pouze jedné cívky (aktivní strany jsou v jedné vrstvě), nazývá se vinutí *jednovrstvé*. Pokud jsou v každé drážce umístěny aktivní strany dvou cívek nad sebou, jedná se o vinutí *dvouvrstvé*. Několik cívek spojených za sebou uložených v sousedních drážkách tvoří *cívkovou skupinu*. Určitý počet navzájem spojených cívkových skupin tvoří *fázi vinutí*. Cívkové skupiny ve fázi je možné spojit sériově nebo paralelně.

#### **Dvouvrstvé vinutí**

U vytvářeného modelu stroje předpokládáme *dvouvrstvá vinutí*. Tato vinutí se používají téměř ve všech strojích počínaje výkonem 15 až 16 kW a konče u velkých hydroalternátorů a turboalternátorů. Pouze některé turboalternátory velkého výkonu s přímým vnitřním chlazením satorového vinutí mají *jednovrstvá vinutí*.

Výhodou dvouvrstvých vinutí je možnost zkrácení kroku k potlačení vyšších harmonických v křivce elektromotorického napětí a možnost navrhnout různé varianty počtu paralelních větví, zlomkového počtu drážek na pól a fázi a rovnoměrnější rozložení čel cívek.

## 2.3 Materiály používané v synchronních strojích

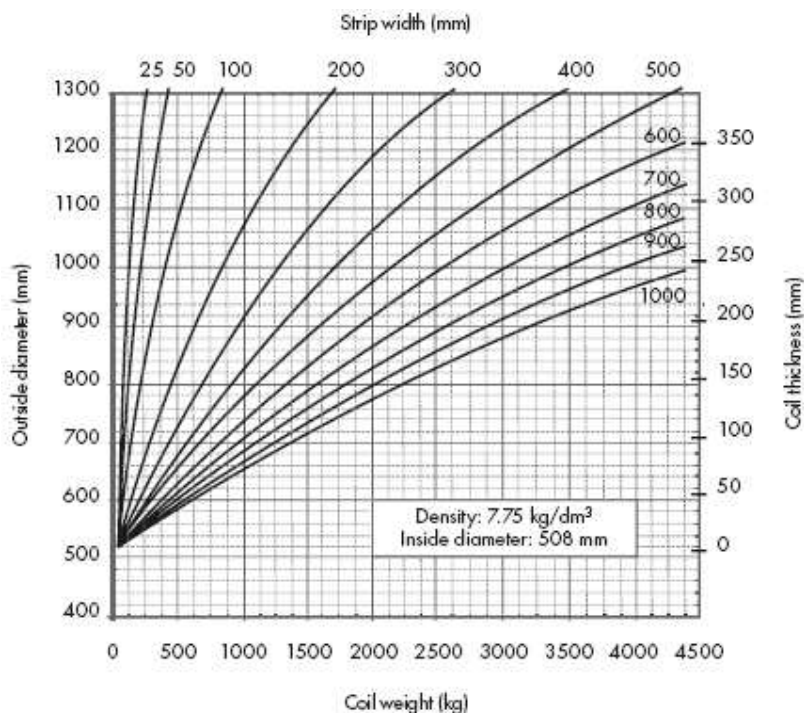
Metodiky návrhu a výpočtu elektrických strojů dosáhly v současné době vysokého stupně dokonalosti a dalšího zlepšení parametrů strojů je možné dosáhnout v mnoha případech jen zlepšením jakosti aktivních materiálů, izolací a konstričních materiálů používaných při konstrukci elektrických strojů.

### 2.3.1 Materiály pro magnetické obvody

Části magnetického obvodu se vyrábějí buďto z tenkých ocelových plechů pro elektrotechniku (elektrotechnických plechů) nebo z lité oceli na odlitky či z litiny, případně z dalších magnetických materiálů. Tenké plechy pro elektrotechniku se vyrábějí z co nejčistší možné oceli.

Vlastnosti oceli závisí na obsahu křemíku a na podmínkách její výroby. Ocel s malým obsahem křemíku má menší poměrnou permeabilitu a větší měrné ztráty. Oceli s vysokým obsahem křemíku mají menší ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní a vysokou poměrnou permeabilitu v polích s malou a střední intenzitou. Přísada křemíku zmenšuje hustotu a zvětšuje rezistivitu oceli.

Pro zmenšení ztrát vířivými proudy se plechy izolují lakem nebo mají už z výroby tepelně stálou izolační vrstvu.



Obr. 6: Závislost vnějšího průměru cívky na hmotnosti

Závislost vnějšího průměru cívky na hmotnosti (Obr. 6). Zde značí *Strip width* šířku pásu, *Outside diameter* vnější průměr, *Coil thickness* tloušťku cívky, *Coil weight* hmotnost cívky, *Density* hustotu a *Inside diameter* vnitřní průměr.





### 2.3.2 Materiály pro vodiče

K materiálům používaných na vodiče patří v první řadě měď a hliník.

Téměř všechny výrobky z mědi se pro elektrotechnický průmysl zhotovují válcováním, lisováním nebo tažením.

Měděné a hliníkové vodiče pro vinutí se vyrábějí s kruhovým a pravoúhlým průřezem. Jejich izolace určuje příslušnost těchto vodičů k určité teplotní třídě.

Měděné lakované vodiče *kruhového průřezu* (dráty) se používají velmi často. Mají malou tloušťku izolace. Lakování vodiče zvětšuje tepelnou vodivost a zlepšuje činitel plnění drážky.

Pro vinutí strojů větších výkonů, v kterých se navrhují drážky s rovnoběžnými boky, tedy drážky pravoúhlého průřezu, se používají vodiče *pravoúhlého průřezu*, které se dříve označovaly jako pásy. Mají zaoblené hrany a mohou se izolovat podobnými způsoby jako vodiče kruhového průřezu. Není příliš vhodné, aby tyto vodiče měly čtvercový průřez (nebo jemu podobný), neboť by se mohly zkroutit a tím pádem by došlo k potížím při navíjení.

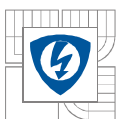
### 2.3.3 Izolační materiály

Izolační materiály se při výrobě elektrických strojů používají k izolaci částí elektrických strojů nacházejících se na různém elektrickém potenciálu. Tyto materiály mohou být plynné, kapalně nebo pevné. V elektrických strojích se používají pevné izolační materiály.

Označení	Teplota [°C]	Materiál
<i>Y</i>	90	papír, dřevo, bavlna, hedvábí, přírodní impregnantry, minerální oleje
<i>E</i>	120	tvrzený papír, přírodní tkanina v kombinaci s fenolickou pryskyřicí
<i>B</i>	130	skleněná vlákna nebo sulfátový papír v kombinaci s fenolickými pryskyřicemi nebo některými upravenými asfalty
<i>F</i>	155	kompozitní materiály ze skleněné tkaniny, epoxidové nebo polyesterové pryskyřice a slídového papíru, aramidové mat.
<i>H</i>	180	silikonové pryskyřice, modifikované epoxidové pryskyřice, aramidy, polyamidy, slídové materiály, skleněné tkaniny
200	200	modifikované polyesterimidy a amidimidy
220	220	modifikované polyimidy
240	240	polyimidy

Tab. 1: Izolační materiály

Tloušťka mezizávitové a drážkové izolace do značné míry určuje rozměry a hmotnost stroje. Tepelná stálost a tepelná vodivost izolace určují dovolené teploty, respektive dovolená oteplení částí stroje, a tím i volbu elektromagnetických zatížení. Izolace musí mít potřebné mechanické



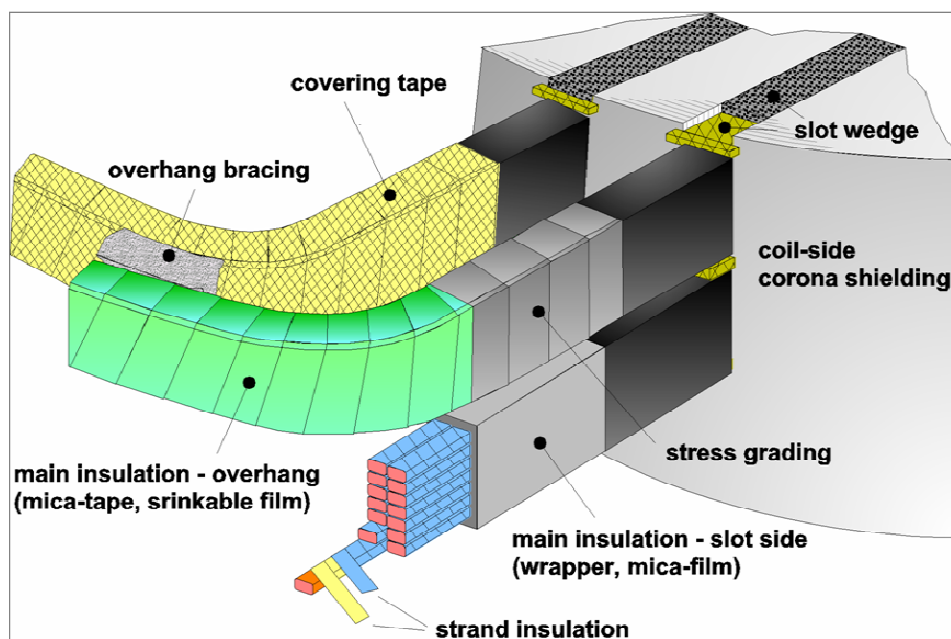
vlastnosti a musí umožňovat mechanizaci a automatizaci technologických procesů při výrobě. Izolace do jisté míry určuje kvalitu elektrického stroje.

Významným faktorem je tedy provozní teplota. Klasifikace izolačních materiálů je řízena normou ČSN EN 60085 a je rozdělena do teplotních tříd (Tab. 1). Teplotní třídou je maximální hodnota teploty, pro kterou je materiál vhodný v provozu.

### **Izolace vinutí střídavých strojů**

Během izolování a zakládání vinutí do drážek stroje je izolace vystavena působení různých mechanických vlivů a při práci stroje pak působení elektrického pole, oteplení, vlivu vlhkosti okolního prostředí, prachu, olejových výparů, plynů atd. Neexistuje jednotný druh elektroizolačního materiálu, který by zajistil absolutní spolehlivost izolace elektrického stroje při působení všech výše zmíněných vlivů.

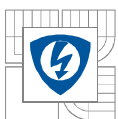
Izolační materiály s velkým izolačním odporem obvykle nevykazují dostatečnou mechanickou pevnost a nevydrží mechanická namáhání při izolování a ukládání do drážek, mechanicky odolné materiály zase obvykle nemají dostatečnou elektrickou pevnost. Proto se při konstrukci elektrické izolace používá ne jeden, ale hned několik různých materiálů, jejichž vlastnosti se navzájem doplňují. Mimo elektrickou pevnost musí mít izolace i dostatečnou tepelnou vodivost, aby mohlo být teplo vznikající při práci ve vodičích odvedeno bez přílišného zvýšení teploty. Hlavními požadavky, které jsou kladeny na izolaci elektrických strojů, jsou tedy velká elektrická pevnost a dobrá tepelná vodivost. Ostatní požadavky (mechanická pevnost, odolnost proti vlhkosti, tepelná stálost, odolnost proti chemickým vlivům,...) jsou kladeny na izolaci pouze z hlediska její schopnosti zachovat elektrickou pevnost při jejím technologickém zpracování a při dlouhodobé činnosti elektrických strojů při určitém druhu zatížení a při působení okolního prostředí.



*Obr. 7: Izolační vrstvy*

Na Obr. 7 je uvedeno uložení vinutí v drážce, v tomto případě se jedná o vedení reprezentované profilovými vodiči.





### Dělení izolace

Podle své funkce se izolace dělí na drážkovou, závitovou a izolaci vodičů.

*Izolace holých plochých drátů* je tvořena fólií a slídovou páskou. Slída, která se vyskytuje v přírodě ve formě uhlí nebo uranu, je surovina, která vykazuje vynikající dielektrické, tepelné a fyzikální vlastnosti. Tepelným, chemickým a mechanickým působením se získá kašovina, po dalším zpracování se vyrobí slídový papír, který tvoří základ každé vysokonapěťové izolace. Tento přírodní materiál vykazuje výborné vlastnosti i jako surovina pro průmyslové materiály, které odolávají vysokým teplotám.

Při zpracování na elektrotechnické izolační materiály, jako jsou pásy (Obr. 8), fólie nebo desky, se slídový papír kombinuje s nejrůznějšími nosnými materiály, aby byla dosažena mechanická pevnost.



Obr. 8: Izolační pásy

Aktivní části cívky, které jsou uloženy v drážkách, bývají zpravidla navíc ovinuty *drážkovou izolací*. Jedná se o rovinný úsek cívky rovnoběžný s osou statorového svazku v případě přímé drážky a v případě drážky šikmé o úsek natočený o tzv. zešíkmení drážky (kdy osa cívky není totožná s osou statorového svazku).

## 3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ A PROGRAM ANSYS

Číslicové počítače se začaly využívat pro výpočet elektrických strojů poprvé na začátku 50. let 20. století v USA a SSSR. V poslední době se počítače rozšířily natolik, že dnes se téměř ani jeden výpočet, ba ani jeden vědecký výzkum v elektromechanice neobejde bez jejich použití.

Číslicové počítače jsou univerzální, mají velkou kapacitu paměti a přesnost výpočtu je dána použitou metodikou výpočtu. V důsledku technické složitosti a univerzálnosti se číslicové počítače obvykle soustřeďují do výpočetních středisek. Aby bylo možné vyhnout se časově náročnému programování a s tím spojeného ladění programů, je nutné snažit se o vytváření univerzálních programů. Číslicové počítače se ve značné míře používají při výpočtu magnetického obvodu, charakteristiky stroje, při mechanických, tepelných a ventilačních výpočtech.

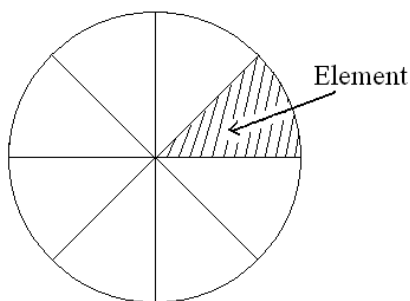
*Výňatek z knihy Stavby elektrických strojů (I.P.Kopylov, Praha 1988)*



### 3.1 Numerické metody řešení

Pro numerický výpočet rozložení elektromagnetického pole je vhodné použít některou z numerických metod.

Numerické metody řešení okrajových úloh vycházejí z principu sestavení složitěho objektu z jednoduchých bloků (prvků, elementů) nebo rozdělení složitěho objektu na malé, jednoduše definované bloky (Obr. 9).



Obr. 9: Rozdělení objektu na elementy

### 3.2 Vývojové trendy elektromagnetické analýzy

- **Minulost**

Ve dvacátých letech dvacátého století neexistovaly počítače ani kalkulačky, přesto se již počítaly úlohy elektromagnetické analýzy. K tomu se používaly tužky, gumy, pravítka, křivítka a především představivost a vynalézavost.

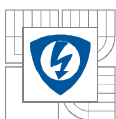
Postupem času se začaly vyskytovat a používat nové výpočetní stroje, které byly schopny pracovat s vyšší rychlostí a efektivitou, než by totéž učinil člověk, a tak bylo v roce 1985 možné modelovat síť ve 2D (ve 3D by příliš zatěžovaly výpočetní systémy), ale výsledky bylo třeba doladit. Rozdělení na jednotlivé elementy a často i dokončení a úprava výsledku se provádělo „od ruky“. Veškeré příkazy byly zadávány pomocí klávesnice (myši a další vstupní zařízení teprve očekávaly na svůj vývoj a nástup na výpočetní scénu). Řešení zadaných úloh jednoduchých nelineárních modelů trvalo v řádech hodin i dní a nepřesnosti výsledků se pohybovaly od 10 % výše, častěji kolem 20 %.

- **Přítomnost**

V současnosti je rychlost řešení daleko vyšší a lze řešit úlohy mnohem složitější, a to i ve 3D. Existuje celá řada programů (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS), která výpočet elektromagnetické analýzy umožňuje se stále lepšími výsledky a příjemnější obsluhou. Programy mezi sebou mohou rovněž „spolupracovat“ (například geometrii řešeného modelu lze nakreslit v CAD systému a výsledek pak importovat do ANSYSu). Chyby výsledku dosahují hodnot menších než 10 %, a toto číslo se postupem času s vývojem počítačové techniky a výpočtových programů stále zmenšuje.

- **Budoucnost**

Do budoucna lze očekávat vývoj počítačů s lepším hardwarovým i softwarovým vybavením, bude tedy možné provádět operace složitější a dosahovat výsledků přesnějších s vyšší rychlostí výpočtu a tím pádem v kratším čase. Rovněž chyby řešení budou dosahovat nižších hodnot.



### 3.3 Popis používaných numerických metod

Mezi numerické metody řešení patří metoda konečných diferencí, metoda konečných prvků, metoda hraničních prvků. Popíšme tyto metody.

#### 3.3.1 Metoda konečných diferencí (MKD, *The Finite Difference Method*)

Metoda konečných diferencí je nejstarší a nejjednodušší z numerických metod pro řešení okrajových úloh. Metoda je založena na obdobném řešení jako metoda konečných prvků. Tato metoda není příliš vhodná pro složitější geometrii. Postup řešení je následující :

1. Oblast, na níž hledáme řešení pole, pokryjeme sítí. Tvar sítě volíme podle požadované přesnosti výsledku a tvaru oblasti sítě s hexagonálními, čtvercovými, nebo trojúhelníkovými oky. V uzlech sítě zavedeme hledané potenciály.
2. V uzlech sítě nahradíme parciální derivace diferencemi. Potenciál v uzlu je vyjádřen pomocí okolních uzlů.
3. Soustavu lineárních rovnic řešíme pomocí některé eliminační metody. Řešení v jednotlivých bodech vyjadřuje hledaný potenciál.

##### Vlastnosti metody:

- lze ji použít na libovolný typ rovnic
- řešení získáme jen v uzlech, pro ostatní je nutné použít interpolaci
- uzavřená hranice umožňuje řešit jen vnitřní problémy
- vedlejší podmínky je nutné realizovat „manuálně“
- jednoduchý princip vede na jednoduchý algoritmus

#### 3.3.2 Metoda konečných prvků (MKP, *The Finite Element Method*)

Metoda konečných prvků je účinná k řešení všech okrajových úloh inženýrské praxe popsaných diferenciálními rovnicemi. Už slova *konečný prvek* charakterizují základní princip metody – transformace systému s nekonečným počtem neznámých (jakákoli část systému) na systém s konečným počtem neznámých, které jsou navzájem svázány prvky konečné velikosti.

Princip spočívá stejně jako u MKD v rozdělení oblasti, zavedení uzlů a uzlových potenciálů. Uzly však mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat okraje hraničních ploch. V místě, kde se čeká prudká změna pole, se zavede větší hustota sítě.

Stejně jako u MKD se sestaví soustava rovnic pro neznámé uzlové potenciály. Koeficienty matice soustavy se ale nepočítají z diferencí, ale jako integrály přes elementární plošky nebo objemy, v jejichž vrcholech jsou uzly. Tyto elementární útvary nazýváme konečnými prvky.

Metoda nachází uplatnění pro výpočet polí složitých geometrických tvarů.

Podrobněji je metoda rozvedena dále.

#### 3.3.3 Metoda hraničních prvků (MHP, *The Boundary Element Method*)

Metoda je vhodná pro řešení integrálních rovnic pole. Je velmi dobrým nástrojem pro řešení úloh z elektrostatiky, magnetických polí stacionárních i časově proměnných.

Využívá se zde princip diskretizace ploch vystupujících v integrálních rovnicích na prvky, stejně jako je tomu u MKP. Její výhoda spočívá v tom, že úlohy nemusí mít uzavřenou hranici a lze je využít pro řešení prostorově neomezených polí.

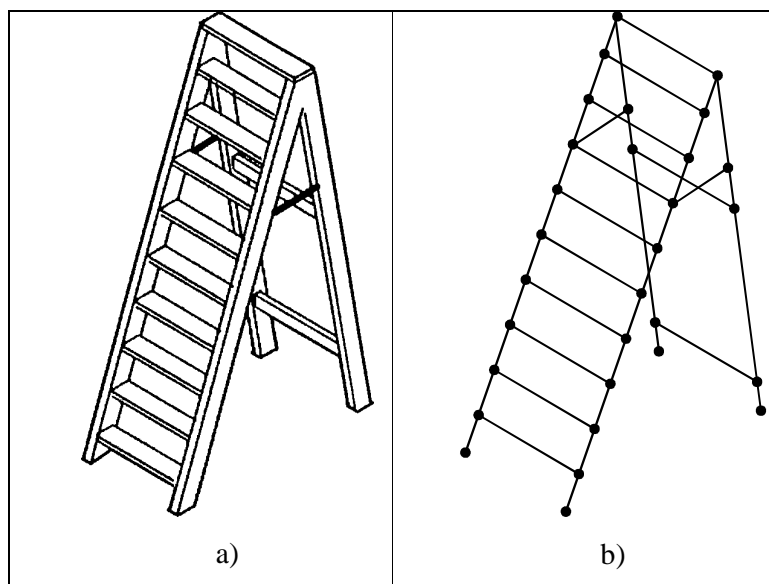
### 3.4 Metoda konečných prvků (MKP, The Finite Element Method)

Již řadu let představují numerické metody přední výpočetní nástroj. Zpočátku nezajímavá metoda konečných prvků se dnes stala jedním z hlavních výpočetních prostředků nejen ve strojírenství, pro kterou byla prvotně určena, ale také ve všech oblastech elektrotechnického průmyslu.

Metodu roku 1943 navrhl Richard Courant (1888 – 1972; americký matematik německého původu). O deset let později byla americkými inženýry použita při provádění pevnostních výpočtů leteckých konstrukcí. Systematické studium metody začalo v šedesátých letech, věnoval se mu Miloš Zlámal (1924 – 1997; zakladatel matematické teorie metody konečných prvků).

MKP je považována za jednu z nejúčinnějších přibližných metod pro řešení problémů popsaných diferenciálními rovnicemi. Svou nezastupitelnou roli sehrává jak při vývoji, návrhu a konstrukci nových elektrotechnických výrobků, tak i v případné rozměrové či materiálové optimalizaci stávajícího zařízení. Hlavní přednost metody spočívá v grafickém provedení často velmi abstraktních fyzikálních polí, ve kterých klasická technika řešení zavádí mnohdy značná zjednodušení na úkor přesnosti.

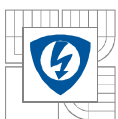
MKP umožňuje simulaci jevů a dějů, které by byly v praxi těžko uskutečnitelné nebo velmi nákladné. Pracuje s modelem fyzikálního problému, který je vytvořen pomocí výpočetního software (např. ANSYS), ve kterém probíhá jeho další analýza a vyhodnocení s případnou rozměrovou či materiálovou optimalizací.



*Obr. 10: Rozdíl mezi technickým systémem a aproximací konečnými prvky*

Obr. 10 zobrazuje a) reálný technický systém a b) model s konečnými prvky.

Základní myšlenkou metody je „ztrianglování“ vyšetřovaného tělesa, tedy rozdělení na konečný počet jednotlivých oblastí, což jsou pro rovinnou úlohu většinou trojúhelníky nebo čtyřúhelníky a pro prostorové úlohy čtyřstěny, pětistěny, kvádry a podobně. Poté se minimalizuje odpovídající potenciální energie na množině spojitých a po částech polynomických funkcí nad již vytvořenou triangulací. Vhodnou volbou bazových funkcí lze tuto úlohu převést na řešení soustavy lineárních (popř. nelineárních) algebraických rovnic, jejichž matice je řídká (obsahuje většinou nulové prvky).



Rídkost matice snižuje nároky na paměť počítače a počet prováděných aritmetických operací. To umožňuje řešit obrovské soustavy až o miliónech rovnic a milionech neznámých.

Hlavní otázkou při určování elektrodynamických sil je výpočet elektromagnetického pole. Tento úkol se analyticky provádí velmi obtížně. K řešení se používají Maxwellovy rovnice, jejich výpočet však probíhá numericky pomocí výpočetní techniky. Výsledkem řešení není jen jedna hodnota fyzikální veličiny (elektromagnetická indukce, intenzita), ale rozložení elektromagnetického pole na celé oblasti modelu. Tímto způsobem lze získat mnohem ucelenější představu a odhalit tak jinak skryté souvislosti. Numerické metody jsou tedy v podstatě jedinou možností, jak vyjádřit silové působení složitých tvarů a uspořádání v rámci elektromagnetických polí.

### 3.5 ANSYS

Jedná se o univerzální softwarový nástroj pro modelování a analýzu. Řešení probíhá pomocí Metody konečných prvků. Program umožňuje řešit problémy z oblasti mechaniky těles, přenosu tepla, proudění kapalin a plynů, magnetismu, elektrických polí a mnoho dalších.



ANSYS (viz Obr. 11) je zároveň schopen jednotlivé oblasti mezi sebou navzájem kombinovat (je tedy možné řešit pole elektro-tepelné, magneto-strukturální,...).



Obr. 11: Program ANSYS

#### 3.5.1 Typy analýzy

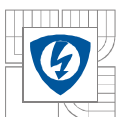
- **Strukturální analýza**

Umožňuje stanovit deformace, mechanické namáhání a síly reakce.

- **Teplotní analýza**

Zabývá se stanovením ustáleného nebo časově závislého rozložení teploty v daném objektu. Mezi další hledané veličiny patří např. tepelné ztráty nebo oteplení, teplotní gradienty, tepelný tok. Teplotní analýza je často následována strukturální analýzou pro výpočet namáhání v důsledku šíření tepla.





- **Elektromagnetická analýza**

- Magnetická analýza**

Používá se pro výpočet magnetických polí. Mezi hledané veličiny v magnetické analýze patří hustota magnetického toku, intenzita magnetického pole, magnetické síly a momenty, impedance, indukčnost, vířivé proudy, výkonové ztráty a rozptyl magnetického toku.

Magnetické pole může být generováno elektrickými proudy, permanentními magnety, případně externími poli.

- Typy magnetické analýzy:

- Statická magnetická analýza* – výpočet magnetických polí generovaných stejnosměrným proudem (DC) nebo permanentními magnety

- Harmonická magnetická analýza* – výpočet magnetických polí v důsledku střídavého proudu (AC)

- Přechodová magnetická analýza* – výpočet magnetických polí generovaných časově proměnným elektrickým proudem nebo externím polem

- Elektrická analýza**

Ta se užívá pro výpočet elektrického pole ve vodivých nebo kapacitních systémech. Mezi hledané veličiny patří: proudová hustota, hustota náboje, intenzita elektrického pole a Jouleovo teplo.

Vysokofrekvenční (VF) elektromagnetická analýza se používá pro řešení prvků mikrovlnné a radiové techniky, vlnodů, radarových systémů, koaxiálních konektorů, apod.

- **Fluidní analýza**

- Používá se pro stanovení toku a teplotních charakteristik proudících tekutin.

- **Analýza spřažených polí**

- Sleduje vzájemné působení mezi dvěma nebo více poli. Jednotlivá pole se navzájem ovlivňují, nelze je tedy řešit samostatně a odděleně od ostatních spřažených polí.

### 3.5.2 Fáze analýzy

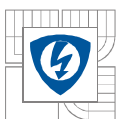
Analýza fyzikálního pole bývá rozdělena do tří základních částí (schematicky na Obr. 12):

1. **PreProcessing** (charakteristika problému)

V této fázi dochází k vytváření modelu a určení jeho geometrických rozměrů. Definujeme tedy klíčové body (*keyponits*), čáry (*lines*), plochy (*areas*), objemy (*volumes*). Následuje volba materiálových vlastností a generování výpočetní sítě (*MESH*). Většinou se zde aplikují i okrajové podmínky (kolmost a rovnoběžnost magnetických toků, neohraničenost okolního prostoru) a zatížení (úbytek napětí, proud, proudová hustota). Model může být jedno, dvou či trojrozměrný (1D, 2D, 3D).

2. **Solution** (řešení)

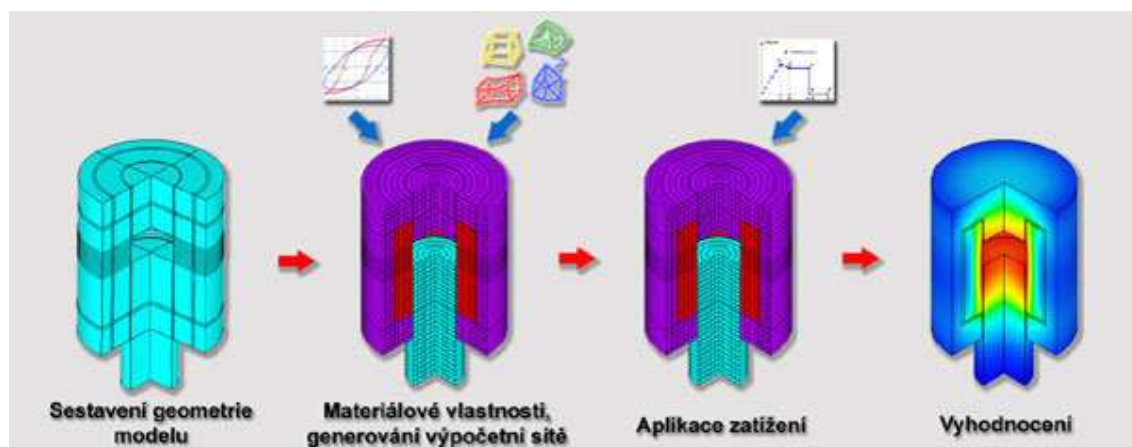
Zde probíhá volba typu analýzy (statická, harmonická, transientní), výběr „řešiče“ optimalizovaného pro dané fyzikální pole a nastavení požadované přesnosti. Přiřazují se zátěže (*loads*), omezující podmínky (*constraints*). Podle typu analýzy se pak volí výpočetní časy či



frekvence, způsob zápisu a tisku výsledků atd. Ve většině výpočetních programů je tato část plně automatizována.

### 3. PostProcessing (výpis a zobrazení výsledků)

V této závěrečné části se provádí vyhodnocení řešené úlohy. K dispozici bývá několik možností grafické interpretace výsledků, z nichž nejpoužívanější je zobrazení mapy elektromagnetického pole či vynesení závislosti elektromagnetických veličin (na čase, rozměru, teplotě, rychlosti atd.).



Obr. 12: Princip řešení pomocí numerických metod

**Postup analýzy lze zapsat i takto:**

1. Rozdělení struktury na malé kousky (prvky s uzly).
2. Popis chování fyzikálních veličin v jednotlivých prvcích.
3. Propojení (sestavení) prvků v uzlech - vytvoření aproximačního systému rovnic pro celou strukturu.
4. Řešení systému rovnic s neznámými veličinami v uzlech (např. posunutí).
5. Dosazení zvolené aproximace do diferenciální rovnice nebo jejího ekvivalentu a sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
6. Výpočet požadovaných veličin (např. deformace a tlak) na zvolených prvcích.

### 3.5.3 Důležité pojmy

#### Uzel (*node*)

Jedná se o souřadnicový bod technického systému, pro který je definován určitý stupeň volnosti (posunutí, potenciál, teplota, apod.) a vnější vliv – akce (síla, proud, tepelný tok, atd.).

#### Element (*element*)

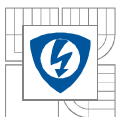
Element je maticová reprezentace interakce mezi stupni volnosti různých uzlů. Elementem může být úsečka, plocha nebo pevné těleso a může být dvoj nebo trojrozměrný.

#### MESHování (*MESHing*)

Jedná se o generování výpočetní sítě (nastavení hustoty sítě). Probíhá po přiřazení vlastností elementům (typ elementu, reálné konstanty, materiálové vlastnosti).

#### Okrajové podmínky (*boundary conditions*)

Důležitou podmínkou elektromagnetické analýzy je okrajová podmínka pro vektorový potenciál, která musí být předepsána alespoň v jednom uzlu. Tato podmínka aplikovaná na



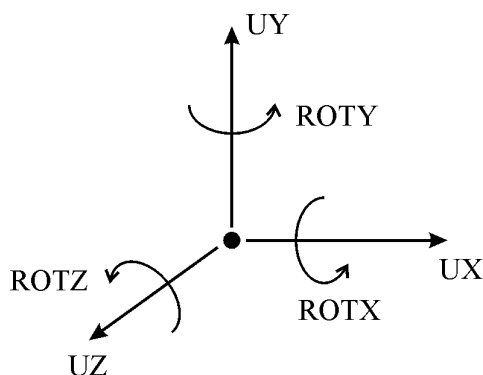
hranici řešené oblasti jednoznačně určuje tuto oblast a všechny magnetické siločáry jsou k této hranici tečné.

### **Stupeň volnosti (*Degree of Freedom*)**

Každý uzel má určitý stupeň volnosti, který charakterizuje odezvu na pole. Podívejme se na stupně volnosti podrobněji.

#### **3.5.4 Stupně volnosti (*Degree of Freedom*)**

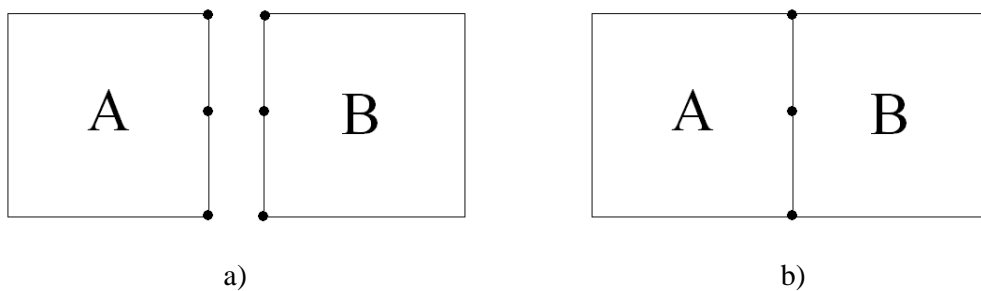
U konstrukčních systémů tvoří všechny stupně volnosti (Obr. 13) 3 translace (posunutí) a 3 rotace (otočení).



*Obr. 13: Stupně volnosti*

Mezi stupně volnosti, které se vyskytují při skalární analýze polí, patří teplota (teplotní analýza), napětí (elektrické pole), tlak (proudění tekutin) nebo skalární magnetický potenciál (magnetické pole).

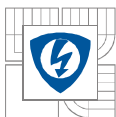
Elementy si předávají informace pouze přes společné uzly.



*Obr. 14: Předávání informací mezi elementy*

V případě samostatných oddělených uzlů element A „nekomunikuje“ s elementem B, jak je vidět z Obr. 14 a). Naopak v případě b), kde jsou uzly navzájem společné, spolu elementy A a B „komunikují“.





### 3.5.5 Typy souborů ANSYSu

Program ANSYS využívá při své činnosti několika tapů souborů, jejichž přípony jsou pro snazší orientaci uvedeny v následující tabulce:

Typ souboru	Přípona souboru
Přihlašovací soubor	*.log
Chybový soubor	*.err
Výstupní soubor	*.out
Databázový soubor	*.db
Záloha souboru s daty	*.dbb
Výsledkový soubor	*.rst
Soubor pro nelineární úlohy	*.sn
Grafický soubor	*.grph
Matice elementů	*.emat
Makro soubor	*.mac
Soubory s údaji o zatěžovacích stavech	*.s01 až *.s99
Soubor s výsledky statické analýzy	*.res

Tab. 2: Typy a přípony souborů ANSYSu

## 4 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE SYNCHRONNÍHO STROJE

Úkolem je výpočet křivky indukovaného napětí nezatíženého synchronního generátoru a následné určení THD křivky napětí. Aby stroj z hlediska celkového harmonického zkreslení vyhověl, nesmí hodnota THD dle platných norem překročit 5%. Předpokládá se, že jednotlivé vyšší harmonické v indukovaném napětí dosahují přijatelných hodnot. Pro dosažení jmenovité hodnoty napětí na svorkách generátoru musíme stroj budit adekvátním budícím proudem, označovaným také jako magnetizační. Stanovení magnetizačního proudu analytickými výpočty je poměrně obtížné, jedná se tedy o jednu z úloh vhodných pro zpracování v ANSYSu.

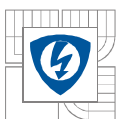
### 4.1 Makra

#### 4.1.1 Definice makra - obecně

Makro je posloupnost příkazů, činností nebo stisknutých kláves, které je možné vyvolat zadáním jediného příkazu.

#### 4.1.2 Makra v ANSYSu

Makra jsou série ANSYS příkazů uložených v konkrétním souboru. Makra mohou být propojena a mohou se na sebe odkazovat.



Makro je možné vytvořit buďto přímo v programu ANSYS nebo pomocí externího textového editoru (např. Wordpadu, poznámkového bloku,...). Pokud je makro jednoduché a krátké, je vhodné jej vytvořit přímo v programu ANSYS. Pro vytvoření delšího a složitějšího makra nebo editaci makra již existujícího je dobré použít textový editor.

Názvy maker se musejí řídit jistými pravidly. Nemohou být stejné jako názvy existujících příkazů používaných v ANSYSu, také jejich první 4 znaky se nesmí shodovat se začátkem názvu těchto příkazů, neboť ANSYS by provedl interní příkaz namísto požadovaného makra. Jméno souboru nesmí obsahovat více jak 32 znaků, nemůže začínat číslem a nemělo by obsahovat mezeru a znaky, které se obvykle na klávesnici nevyskytují.

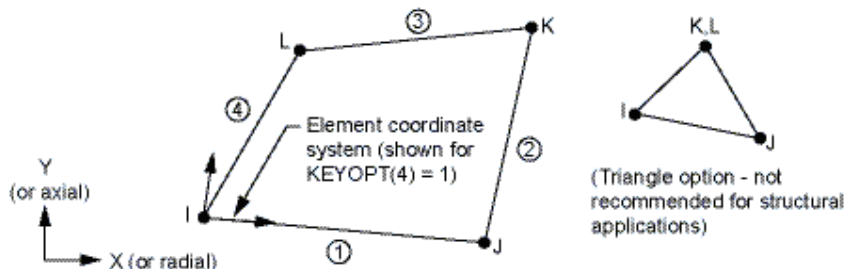
Makra v ANSYSu jsou prostředkem k rozšíření schopností programu. Jazyk, který používají, je ve své struktuře založený na FORTRAN (programovací jazyk určený zejména pro vědecké výpočty a numerické aplikace vyvinutý v letech 1954 – 1957 pro IBM 704 týmem IBM vedeným Johnem W. Backusem).

### 4.1.3 APDL

APDL (ANSYS Parametric Design Language) je interní programový prostředek ANSYSu umožňující v preprocessoru a postprocessorech ANSYS parametrické definice geometrie modelu, okrajových podmínek, zatížení nebo například vytváření vlastních příkazů složených z jednotlivých příkazů prostředí ANSYS.

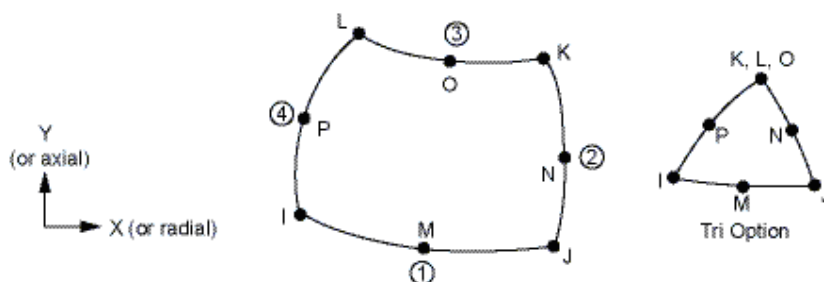
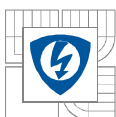
ANSYS podporuje řadu příkazů z prostředí dialogových menu Windows. Tento přístup je velmi efektivní hlavně u příkazů, které obsahují řadu parametrů, navíc se vzájemnými vazbami.

## 4.2 Elementy používané v programu

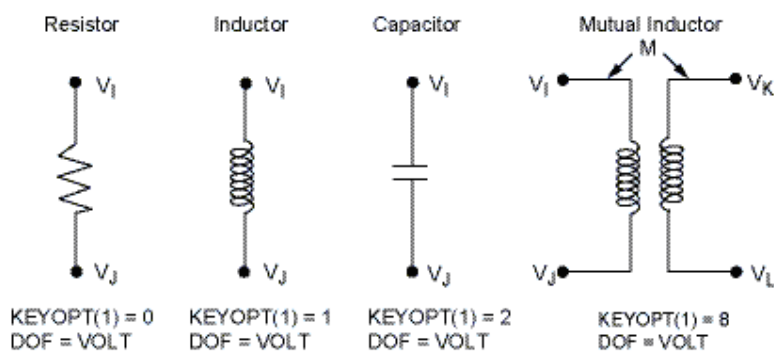


Obr. 15: *Element PLANE13*

PLANE13 (Obr. 15) pomáhá modelovat 2D magnetické pole. PLANE53 (Obr. 16) je složitější než předchozí element, ale umožňuje přesnější operace. Tento element je definován nejméně čtyřmi, nejvíce osmi uzly a má 4 stupně volnosti na uzel – z složku magnetického vektorového potenciálu (AZ), časově integrovaný elektrický skalární potenciál (VOLT), elektrický proud a elektromagnetickou sílu (EMF). PLANE53 je založen na magnetickém vektorovém vyjádření a používá se při nízkofrekvenční analýze magnetického pole. Dalším použitým elementem je CIRCU124 (Obr. 17).



Obr. 16: Element PLANE53

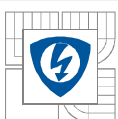


Obr. 17: Element CIRCUI24

## 5 PARAMETRY STROJE

### 5.1 Zadané parametry

Označení	Parametr	Poznámka
$un$	jmenovité napětí stroje (rotoru)	
$i2s$	sdružený statorový proud	
$p$	počet pólů stroje	správné označení $2p = \dots$
$u1$	jmenovité budicí napětí	
$sdrs$	průřez drátů statoru ( $m^2$ )	
$pdd$	počet drátů v drážce	
$ppd$	počet paralelních drátů	
$ppv$	počet paralelních větví	
$pz$	počet závitů, kde dochází k indukci napětí	
$qd$	počet drážek	
$y$	krok cívky z 1. do y-té drážky	
$rhr$	poloměr hřídele	



<i>typv</i>	typ vinutí	vinutí soustředné ( <i>typv</i> = 1), se stejnými cívkami ( <i>typv</i> = 2)
<i>vn</i>	výška nástavce	
<i>vp</i>	výška pólů	
<i>sp</i>	šířka pólů	
<i>sn</i>	šířka nástavce	
<i>zpn</i>	délka zkosení pólového nástavce	
<i>deltamin</i>	radiální rozměr vzd. mezera min.	
<i>deltamax</i>	radiální rozměr vzd. mezera max	
<i>dss</i>	délka statorového svazku	
<i>vnips</i>	vnitřní průměr plechu statoru	
<i>rrot</i>	čistý poloměr rotorového svazku	
<i>vneps</i>	vnější průměr plechu statoru	
<i>xk</i>		pouze u vodičů obdélníkového průřezu
<i>h0</i>	výška drážky	
<i>h1</i>		
<i>b0</i>	šířka drážky	
<i>h2</i>		
<i>vl</i>	vložka na dno a pod klín drážky	pouze u vodičů obdélníkového průřezu
<i>mvl</i>	mezivložka	pro vysokonapěťové nebo nízkonapěťové stroje
<i>hk</i>	výška mag. klínu	pouze u vodičů obdélníkového průřezu
<i>deltahk</i>	posun krajní hrany klínu od vzduchové mezery	pouze u vodičů obdélníkového průřezu
<i>b1, b2</i>		pouze u vodičů kruhového průřezu
<i>hizk</i>	výška izolace	pouze u vodičů kruhového průřezu
<i>nd</i>	počet drážek statoru	



**Parametry budicího vinutí:**

<i>sd1</i>	průřez vodiče	
<i>nz1</i>	počet závitů na pól	
<i>imag</i>	magnetizační proud	

**Parametry amortizeru:**

<i>npt</i>	počet tyčí amortizeru na 1p včetně vynechaných tyčí	
<i>h0t</i>	šířka můstku rotoru	
<i>rtam</i>	poloměr tyče amortizeru	
<i>ntam</i>	číslo tyčí amortizeru, které mají být vynechány	

**Další parametry:**

<i>r20</i>	rezistivita mědi	
<i>koef</i>	teplotní závislost	
<i>dt</i>	oteplení [K]	
<i>fre</i>	úhlová rychlost rotoru	
<i>mgchr</i>	materiálové vlastnosti	
<i>klin</i>	drážkový klín	magnetický (klin=1), nemagnetický (klin=2)

*Tab. 3: Zadané parametry*

U modelu předpokládáme dvouvrstvé vinutí.

**5.1.1 Drážka statoru**

Parametr	Hodnota
<i>h0</i>	0,0015 m
<i>h1</i>	0,0025 m
<i>h2</i>	0,033 m
<i>hk</i>	0,0025 m
<i>deltahk</i>	0,0015 m
<i>vl</i>	0,0005 m
<i>mvl</i>	0,003 m pro nízkonapetové stroje,

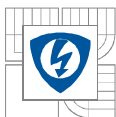


	0,006 m pro vysokonapetové stroje
$b_0$	0,012 m
$x_k$	0,001 m
$s_{drs}$	$28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
$ppv$	8
$ppd$	1
$y$	12
$p_z$	4

Tab. 4: Hodnoty pro vinutí obdélníkového průřezu

Parametr	Hodnota
$h_0$	0,0015 m
$h_1$	0,0025 m
$h_2$	0,034 m
$h_{izk}$	0,001 m
$b_0$	0,005 m
$b_1$	0,013 m
$b_2$	0,0147 m
$d$	0,0017 m
$s_{drs}$	$\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 2.2698 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
$ppv$	8
$ppd$	9
$y$	11
$p_z$	5

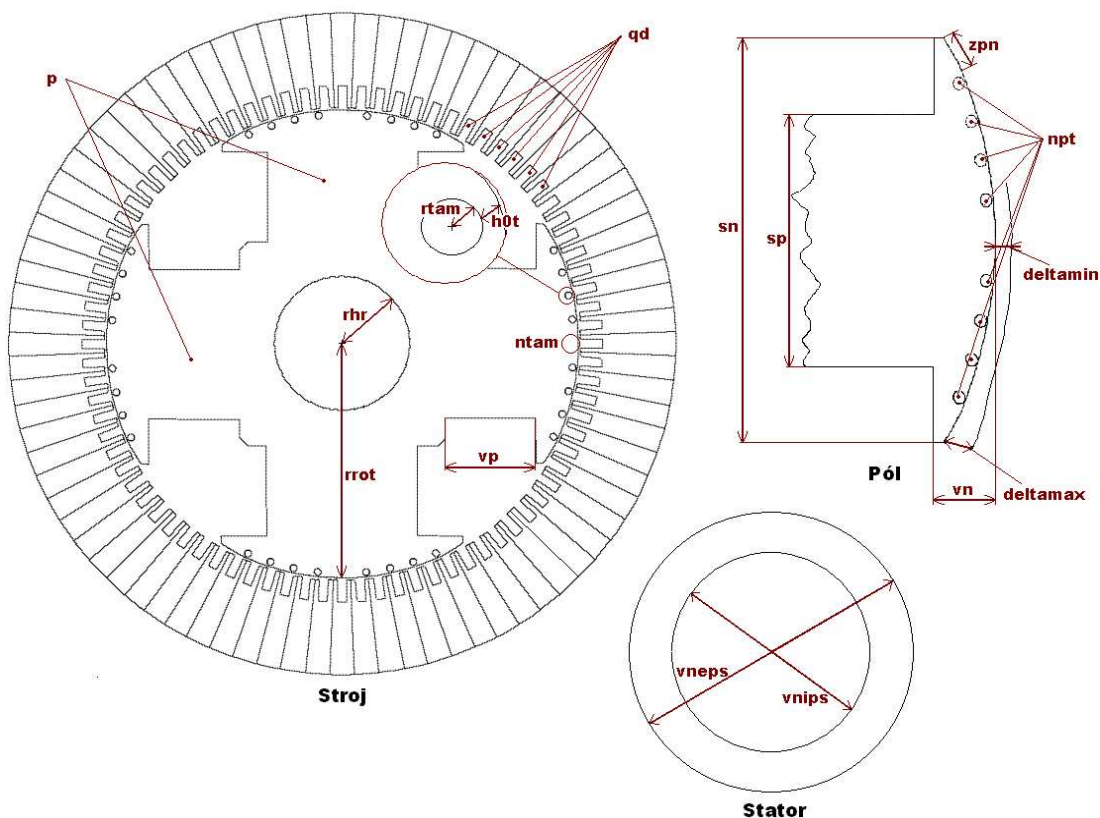
Tab. 5: Hodnoty pro vinutí kruhového průřezu



## 5.2 Vypočítané parametry

Označení	Parametr	Poznámka
$\epsilon$	zkrácení kroku	$\epsilon = \frac{y-1}{\frac{q}{p}}$
$\omega_{rot}$	úhlová rychlost	$\omega_{rot} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{re}}{\frac{p}{2}}$
$\theta$	úhel mezi osou pólu a osou mezery mezi póly	$\theta = \frac{360}{2 \cdot p} \cdot \frac{\pi}{180}$
$sc$	průřez strany cívky statoru	viz kapitola 7.2
$rc$	průřez strany cívky rotoru	$rc = \left( (r_{rot} - vp - vn) \cdot \tan(\theta) - \frac{sp}{2} \right) \cdot vp$
$c_{filr}$	činitel plnění cívky rotoru	$c_{filr} = \frac{nz1 \cdot sd1}{rc}$

Tab. 6: Vypočítané parametry

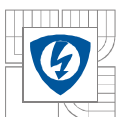


Obr. 18: Zadané parametry



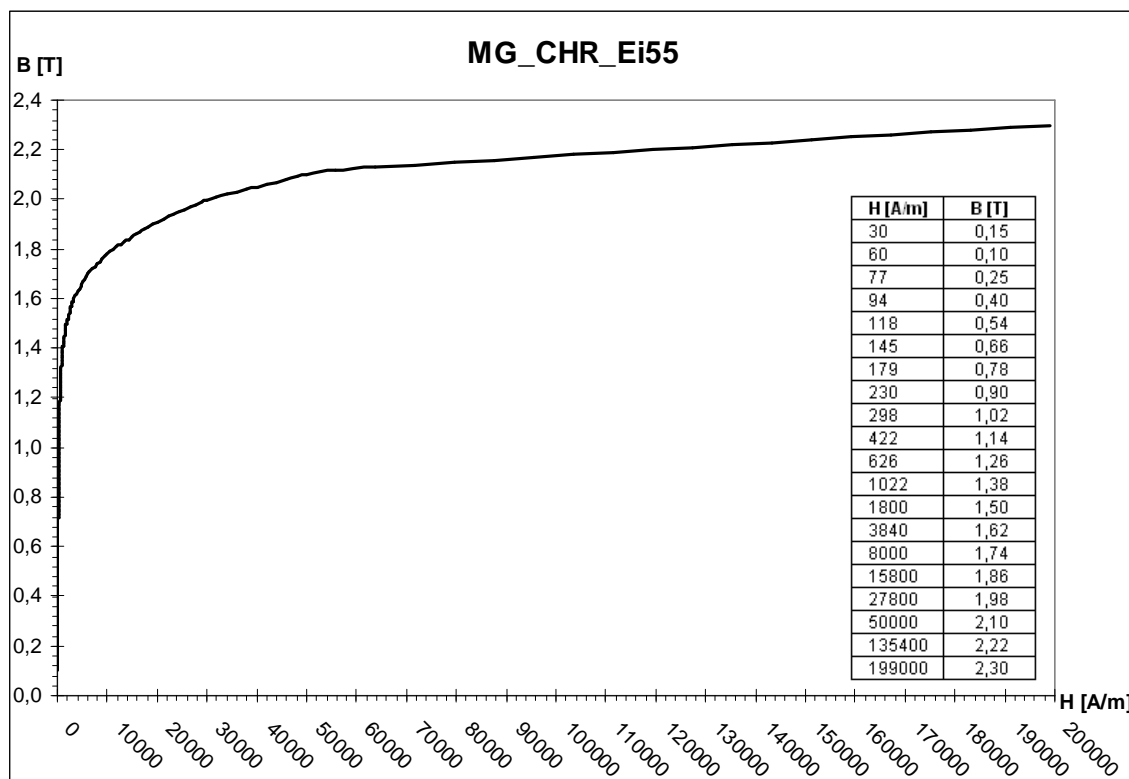
Šířka mezivložky je pro své malé rozměry a zjednodušení výpočtu zanedbána.





### 5.3 B-H charakteristika drážkového klínu

Vložením magnetických vlastností materiálů B-H charakteristikou se stává analýza nelineární. Pokud B-H charakteristiku používáme, uložíme ji do zvlášť připraveného souboru. Je třeba zvážit, jestli je simulovaná soustava sycena tak, že se magnetický obvod ještě pohybuje v lineární části B-H charakteristiky, pak je jednoznačně výhodnější zadat materiálové vlastnosti konstantní permeabilitou. V našem případě však B-H charakteristiku použijeme (viz Obr. 20).



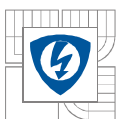
Obr. 20 B-H křivka

## 6 VYTVOŘENÍ PARAMETRICKÉHO MODELU

Pro snadnou orientaci je vhodné využívat pro jednotlivé pracovní úkony pomocné adresáře a samotné výpočty provádět v adresáři pracovním. Každý úspěšně provedený úkon je vhodné zálohovat, během vytváření modelu často dochází k změnám zdrojového kódu i v jeho částech, které již dávno považoval uživatel za vyřešené. Jednotlivé adresáře i soubory by měly být pojmenovávány dle logického klíče, který bude uživateli vyhovovat.

Pro správné pochopení chodu programu ANSYS je důležité správným způsobem využívat dokumentaci k programu, neboli *HELP*. Každý příkaz je zde podrobně rozebrán, přičemž je nutné pochopit funkci i celkové možnosti vybraných stěžejních příkazů.

Jako každý jiný program je vhodné i makrosoubory popisovat. Poznámky od zpracovávaných příkazů odděluje symbol „!“.



## 6.1 Moduly programu

### 6.1.1 Modul Preprocessing

Modul preprocessing slouží k vytvoření modelu fyzikální soustavy. K vytvoření modelu fyzikální soustavy je nutno zadat geometrické rozměry a nejrůznější konstanty, které soustavu charakterizují (např. počet pólů, počet drážek statoru, konstanty charakterizující vinutí,...). Je vhodné použít koncepci, kdy jsou všechna vstupní data vyvedena do zvláštního souboru, lze je pak snadno editovat a spravovat. Naopak nevhodné je průběžné vkládání vstupních hodnot přímo do těla makrosouboru, což často vede k duplicitám a nepřesnostem.

Velmi důležitá je volba používaných typů elementů, které musí svými možnostmi a nastavením odpovídat modelované soustavě. Pro 2D magnetickou analýzu jsou využívány elementy PLANE13 nebo PLANE53. Element PLANE53 poskytuje díky složitější struktuře přesnější výsledky a umožňuje spřažení s elementem CIRCU124, což využíváme pro tzv. *Electromagnetic-circuit simulation*. V tomto typu simulací kombinujeme elektrický obvod s klasickým konečněprvkovým modelem, využíván je především u elektrických strojů, kde elektrický obvod představuje vinutí a je spřažen s modelem stroje, tedy magnetickým obvodem.

K typu elementu se dále vážou materiálové konstanty a tzv. *Real constant sets*. Materiálovými konstantami nastavujeme geometrické entity modelu ty vlastnosti, které jsou charakteristické pro část stroje, kterou reprezentují. Např. ploše tvořící stranu cívky přiřadíme z materiálových veličin rezistivitu a relativní permeabilitu. Do *Real constant sets* uvedeme počet závitů cívky, činitel plnění cívky, délku v ose z, průřez cívky a počáteční orientaci proudu. Rezistoru přiřadíme rezistivitu, zdroji napětí svorkové napětí. Ploše segmentu plechu statoru postačuje zadat magnetické vlastnosti relativní permeabilitou nebo B-H charakteristikou.

Pro případ analýzy teplotních polí umožňuje zadat ANSYS materiálové vlastnosti v závislosti na teplotě.

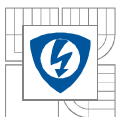
Pokračujeme tvorbou geometrie modelu, přičemž plně využijeme parametrického modelování. Výhodou parametrického modelování je to, že pouhou změnou parametru a opětovným načtením makra snadno model pozměníme.

Při modelování geometrie lze využít dvou možných přístupů, můžeme jako prvotní objekty použít složitější entity, jako jsou objemy nebo plochy a ty poté pomocí Booleovských operací formovat do požadované podoby, nebo vytvářet nejprve entity jednodušší, keypointy či úsečky a z nich poté vytvářet objekty složitější. Oba tyto přístupy lze s úspěchem kombinovat.

Další fází je přiřazení atributů ploše, kterou se chystáme meshovat. Mezi tyto atributy řadíme typ elementu, *Real const. sets* a materiálové vlastnosti.

Před meshováním je nutno nastavit požadovanou velikost elementu. Lze nastavit vhodné dělení hraniční čáry plochy („*lesize*“) nebo přímo dané ploše přiřadit velikost elementu („*aesize*“).

Pro dosažení dostatečně přesných výsledků je nutné volit vhodnou hustotu MESHe. Pro zadanou úlohu je důležité správným způsobem vymodelovat a vymeshovat oblast pólových nástavců, vzduchové mezery a zubů statoru. Pokud bychom nastavili hustotu MESHe v celém modelu stroje na shodné úrovni, tak by při dodržení potřebné hustoty MESHe v klíčových partiích stroje neúměrně narostl celkový počet elementů a tím i náročnost na dobu výpočtu. Je vhodné zvyšovat hustotu meshe i tam, kde se skokově mění parametry modelu, opět se jako



příklad nabízí vzduchová mezera (ANSYS ji považuje za úzkou štěrbinu s materiálem o  $\mu_r = 1$ ).

U synchronních strojů s elektromagnety na rotoru lze buzení zadat pomocí proudové hustoty.

Před spuštěním výpočtu je nutné vytvořit tzv. *Sliding interface*, tj. rozhraní mezi dvěmi nezávislými částmi modelu sloužící k propojení do jednoho celu při současném dodržení podmínky rozdělené geometrie. Propojení je realizováno zapsáním vazebních rovnic, které zaručují rovnost hodnot stupňů volnosti v obou částech modelu. Ze statoru selektujeme styčné elementy, z rotoru styčné uzly. Z takto vyselektovaných entit vytvoříme komponentu pro zápis vazebních rovnic během výpočtu.

### 6.1.2 Modul Solution

V tomto modulu dochází k samotnému výpočtu polí stroje. Avšak vzhledem k zajištění pohybu rotoru modul Preprocessing a Solution částečně splývají. Samotnému řešení transienční analýzy synchronního generátoru předchází jeden statický loadstep, kterým jsou propočtena pole v ustáleném stavu.

### 6.1.3 Modul Postprocessing

Na konci každého loadstepu mohou být zaznamenána jakákoliv vypočítaná data (např. rozložení siločar, magnetické indukce,...).

## 6.2 Práce s parametrickým modelem – profilové vinutí

Celý model je pro snadnější průběžnou kontrolu rozdělen na sekvenci maker plus makro vstupních dat. Všechny parametry jsou vyvedeny do souboru *inputdata.mac*.

Před spuštěním makra vždy odstraníme stávající analýzy z pracovního okna ANSYSu a pomocí *Utility Menu->File->Read Input From* makro načteme z pracovního adresáře.

### 6.2.1 Makro inputdata.mac

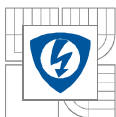
V tomto makru jsou soustředěny veškeré veličiny nutné pro vytvoření modelu.

Z hlediska funkčnosti modelu je potřeba nastavit parametr „mgchr“:

*mgchr* = 1      pro nelineární charakteristiku feromagnetických materiálů s použitím BH křivek,

*mgchr* = 2      pro výpočet za předpokladu konstantní relativní permeability.

Výsledkem tohoto makra je tedy uložení všech parametrů potřebných k vytvoření funkčního modelu do databáze ANSYSu.



### 6.2.2 Makro modeling&meshing1.mac

Úvodní makro *modeling&meshing1.mac* slouží k výběru vhodných typů elementů včetně nastavení *Keyopts* a *Real const. sets*.

#### PŘÍKLAD:

##### Element statorových cívek – fáze U+

```
!element statorovych civek - phase U+
ET,10,PLANE53
KEYOPT,10,1,3
R,10,sc,pz,dss,1,cfils
mp,murx,10,1
mp,rsvx,10,rsv_cl
```

Příkazem *ET* definujeme lokální element, jehož vlastnosti dále nastavíme pomocí *KEYOPT*. Použitím *R* nadefinujeme materiálové konstanty, *mp* slouží k definici materiálových vlastností jako konstanty nebo jako funkce teploty.

Následuje vytvoření kompletní geometrie modelu, stator je navíc vymeshován včetně nastavení vybraných materiálových vlastností nebo typů elementů.

#### PŘÍKLAD:

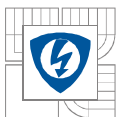
##### Plocha mezivložky statorové drážky

```
k,5017,b0/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+deltahk+hk+(h0+h1+h2-
-hk-deltahk)/2-mvl/2
k,5018,-b0/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+deltahk+hk+(h0+h1+h2-
-hk-deltahk)/2-mvl/2
k,5019,b0/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+deltahk+hk+(h0+h1+h2-
-hk-deltahk)/2+mvl/2
k,5020,-b0/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+deltahk+hk+(h0+h1+h2-
-hk-deltahk)/2+mvl/2
! vytvoreni mezivlozky
a,5017,5018,5020,5019
```

Nejprve je třeba vytyčit obrys plochy mezivložky z jednotlivých keypointů (příkaz *k*). Ten se skládá z odkazového čísla konkrétního keypointu a ze souřadnic jeho umístění. Protože je obrys plochy tvořený úsečkami, lze založit plochu přes příkaz *a*.

Pro snížení výpočetních nároků je místo plného 2D řezu strojem modelován pouze segment řezu odpovídající dvěma pólům stroje. Toto zjednodušení je umožněno symetrií magnetického pole stroje a je vyloučeno pro stroje se zlomkovým vinutím, kde počet cívek ve fázovém svazku není konstantní. Obvodový model vinutí je zapojován pouze pro jeden fázový svazek. Je známo, že počet fázových svazků odpovídá počtu pólů stroje, je proto nutné správně vynásobit amplitudu vypočtené křivky indukovaného napětí stroje tak, aby byl zohledněn počet paralelních větví statorového vinutí a počet fázových svazků.

Proces tvorby geometrie začíná vykreslením rotoru. Během zápisu hodnot do *inputdata.mac* je potřeba zadat číslo tyčí amortizéru, které budou vynechávány. Stator je vytvářen



rozkopírováním vymeshovaného segmentu statoru odpovídajícímu drážkové rozteči. Proto jakékoliv změny nastavení dělení na mesh jsou vázány právě na jeden segment. Velmi důležité je jemné meshování části vzduchové mezery, která přísluší k rotoru, magnetických klínů a železa v oblasti vzduchové mezery. Elementy by měly být co nejpravidelnějšího tvaru a v dostatečně hustém sponu. Na šířku (radiálně) by vzduchová mezera měla být rozdělena minimálně čtyřmi elementy.

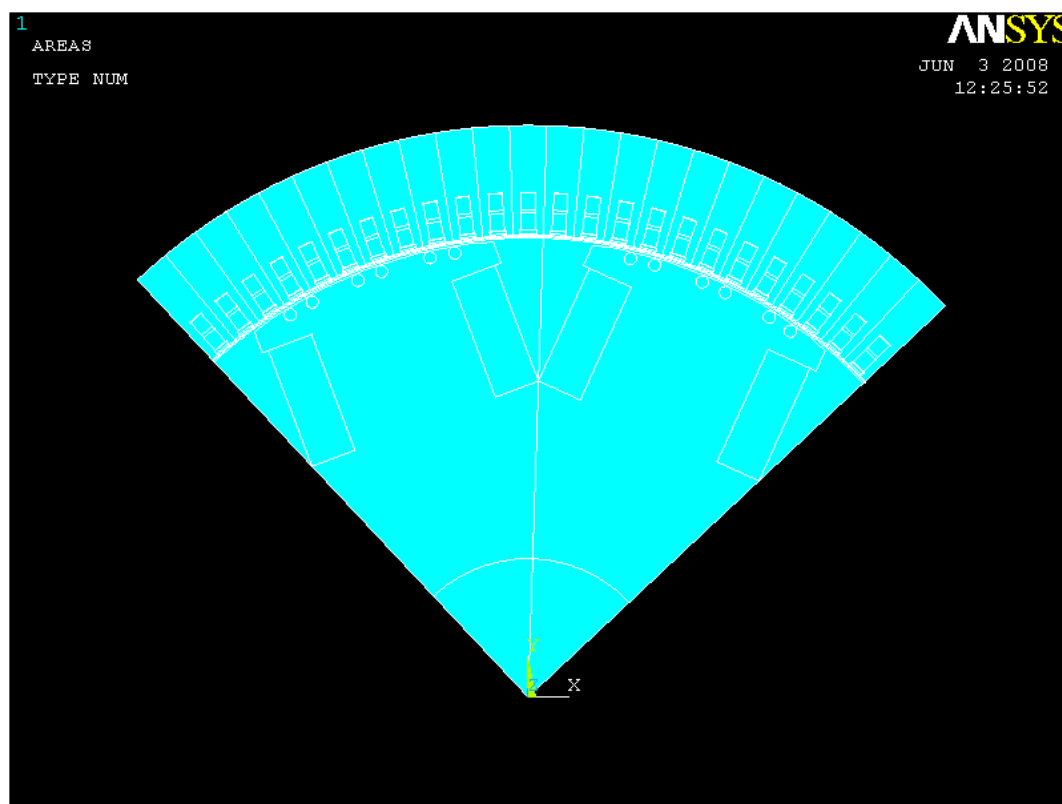
### PŘÍKLAD:

#### Nastavení dělení pro MESH – opět mezivložka

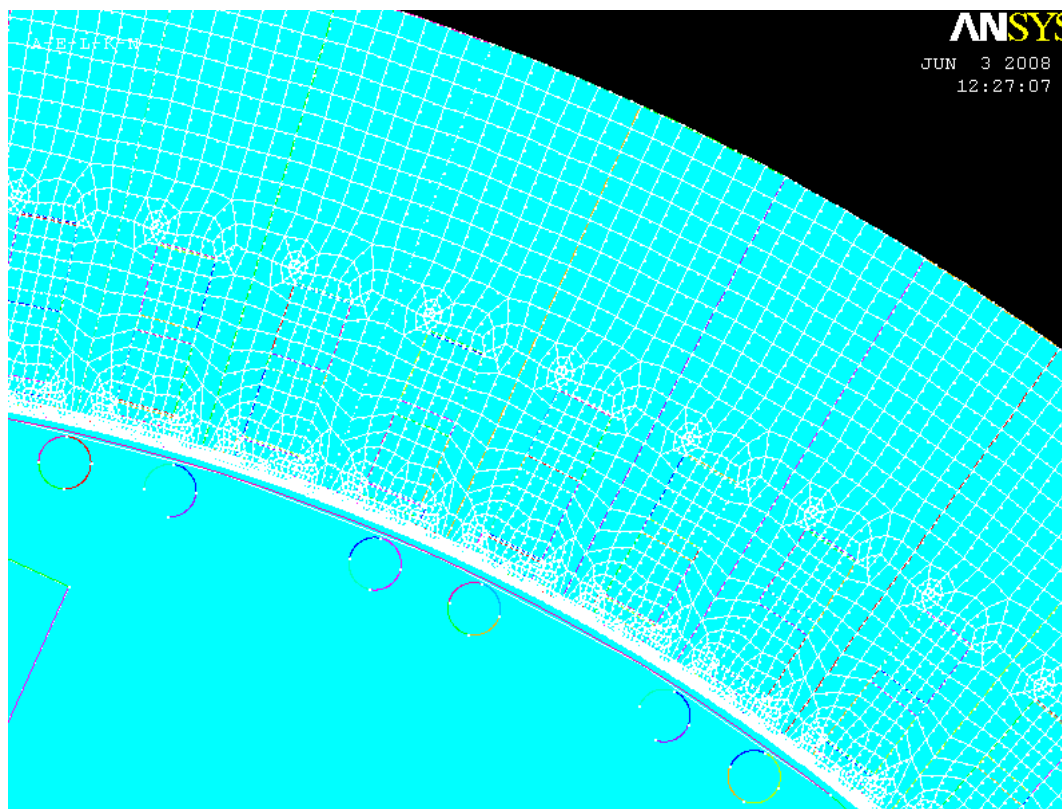
```
asel,s,loc,x,vnips+h0+h1+h2/2-mvl,vnips+h0+h1+h2/2+mvl  
lsla,s  
lesize,all,0.004,,,,0,,,1 !deleni po 2 mm  
  
amesh,all
```

Příkazem *asel* vybíráme množinu oblastí – vybereme oblasti zadáním nejbližší a nejvzdálenější hranice od středu soustavy souřadnic, vybrané oblasti leží mezi těmito hranicemi. *Lsla* vybere lines (čáry) obsažené ve vybraných oblastech. Před meshováním je nutno nastavit požadovanou velikost elementu, zde je vhodné dělení vybraných hraničních čar plochy pomocí *lesize*. *Amesh* vymeshuje vybrané oblasti.

Stav modelu na konci makra zobrazuje Obr. 21 a Obr. 22.



Obr. 21: Stav ke konci makra



*Obr. 22: MESH statoru*

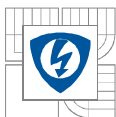
### 6.2.3 Makro modeling&meshing2.mac

V tomto makru je dokončeno meshování stroje (Obr. 23, Obr. 24) a všem komponentám jsou přiřazeny veškeré atributy. Výsledná databáze je připravená pro tvorbu obvodových modelů.

Při meshování rotoru se soustředíme na dosažení co nejlepší kvality především u vzduchové mezery a dále podél vnějšího radiusu pólového nástavce.

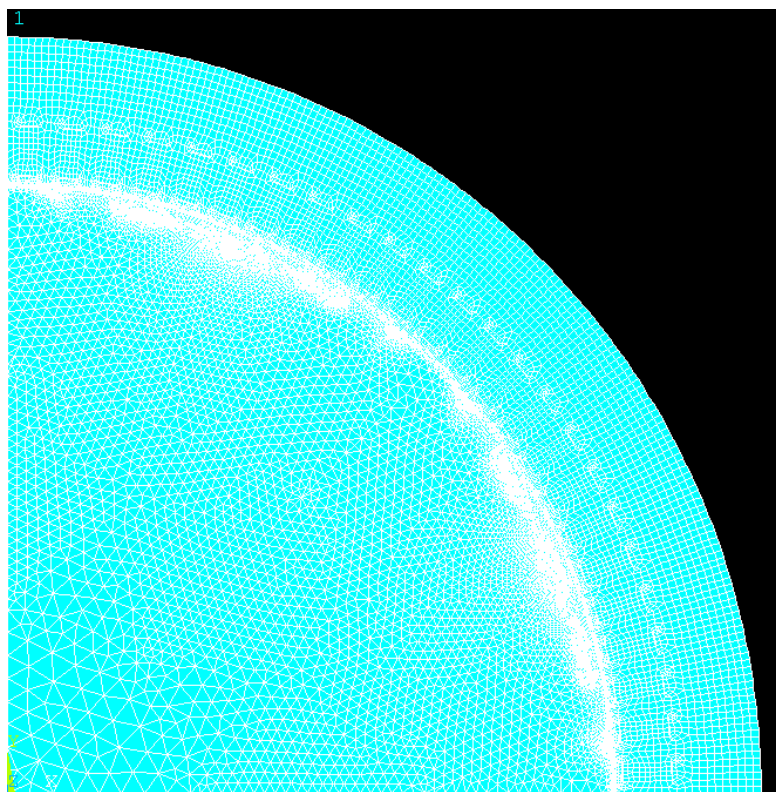
Komponenta stator zahrnuje veškeré statické entity modelu, zatímco komponenta rotor entity rotující. Tyto komponenty nejsou v modelu svázány, představují tedy nespojitost, která je z hlediska řešení polí ANSYSem překryta zápisem vazebních rovnic. K zápisu vazebních rovnic je vytvořeno sliding interface, tvořeno elementy komponenty statoru a nody komponenty rotoru, které leží na hraně nespojitosti modelu. V každém případě musí být všechny nody a elementy na sliding interface provázány.

V Tab. 7 je uvedeno nastavení dělení pro MESH u jednotlivých částí stroje, aby byla zajištěná potřebná velikost elementů tam, kde to vyžadujeme (tedy především zvýšená hustota v oblasti vzduchové mezery). Malá velikost elementů (a následná zvýšená hustota MESHe) na místech, která nevyžadují naši zvýšenou pozornost při výpočtu magnetické indukce (např. na hřídeli), by vedla ke zbytečnému zvýšení výpočtového času.



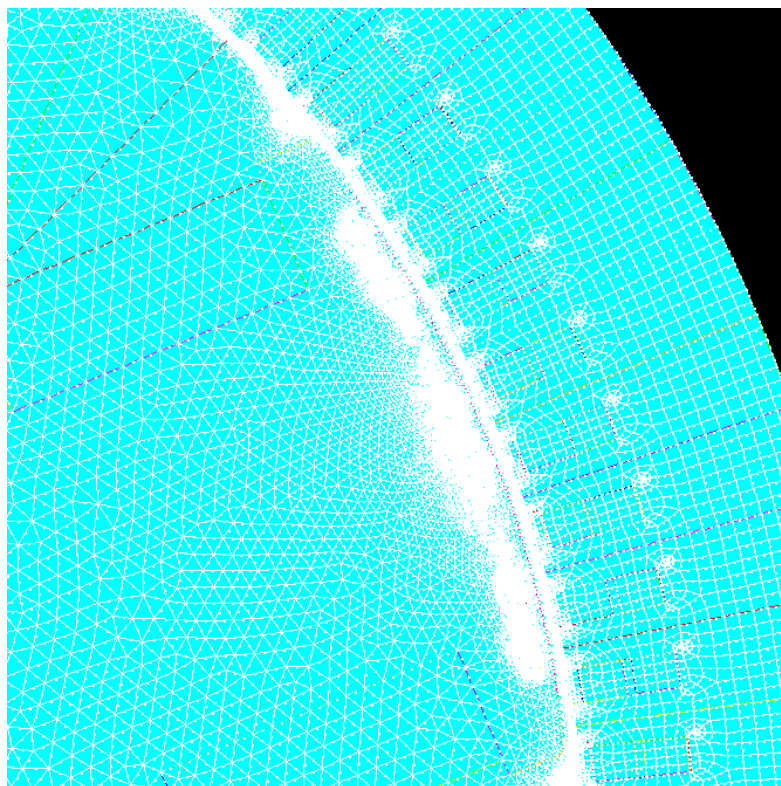
Část modelu stroje	Dělení pro MESH
Hřídel	dělení čar na 8 dílků
Cívky	7 mm
Amortizér	dělení čar na 7 dílků
Pólový nástavec	2,5 mm
Střed vzduchové mezery	2,5 mm
Povrch vnitřku statoru	3 mm
Klíny	1,5 mm
Vložka pod klín	3 mm
Mezivložka	4 mm
Vložka na dno drážky	4 mm
Statorové cívky	4 mm
Plech statoru	5 mm

*Tab. 7: Nastavení dělení pro MESH*



*Obr. 23: MESH stroje*

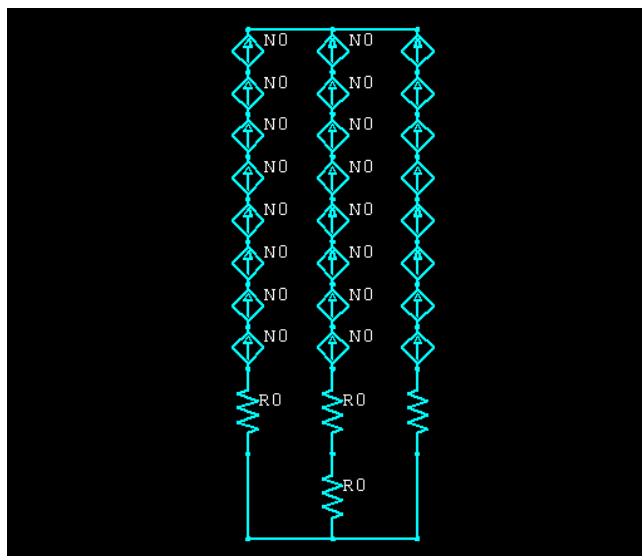




*Obr. 24: MESH – detail pólu*

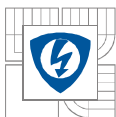
#### 6.2.4 Makro winding.mac

Popis tohoto makra se zaměří na variantu zapojení vinutí pro segment řezu strojem. Při modelování kompletního řezu strojem je vytváření modelu vinutí složitější o výběr fázových svazků a jejich vzájemnému pozapojování s ohledem na počet paralelních větví vinutí. Obr. 25 zachycuje zapojení vinutí zobrazené přímo v programu ANSYS.



*Obr. 25: Zapojení vinutí*





### 6.2.5 Makro run.mac

Úvodní sekvencí makra sloužícího k propočtu celého modelu je statické řešení magnetického pole, které přechází následněmu transientnímu řešení polí stroje s otáčejícím se rotorem.

Inicializaci statického řešení předchází zápis vazebních rovnic, které jsou nezbytně nutné vzhledem k požadované geometrické nespojitosti modelu.

Po samotném spuštění transientní analýzy dochází v každém kroku k vymazání předchozích vazebních rovnic a následnému pootočení rotoru do potřebné pozice.

Konečnou fází makra je postprocessing vypočtených dat, kdy z nodů zakládajících fázové rezistory, je odečten průběh napětí během celého výpočtu.

#### Proudové hustoty

K výpočtu proudové hustoty je třeba nejprve zjistit velikost plochy vinutí *scoil*:

$$scoil = \left( (rrot - vp - vn) \cdot \tan(\theta) - \frac{sp}{2} \right) \cdot vp \quad [\text{m}^2], \quad (7)$$

Nyní již nic nebrání dalšímu výpočtu:

$$j = \frac{imag \cdot nz1}{scoil} \quad [\text{Am}^{-2}], \quad (8)$$

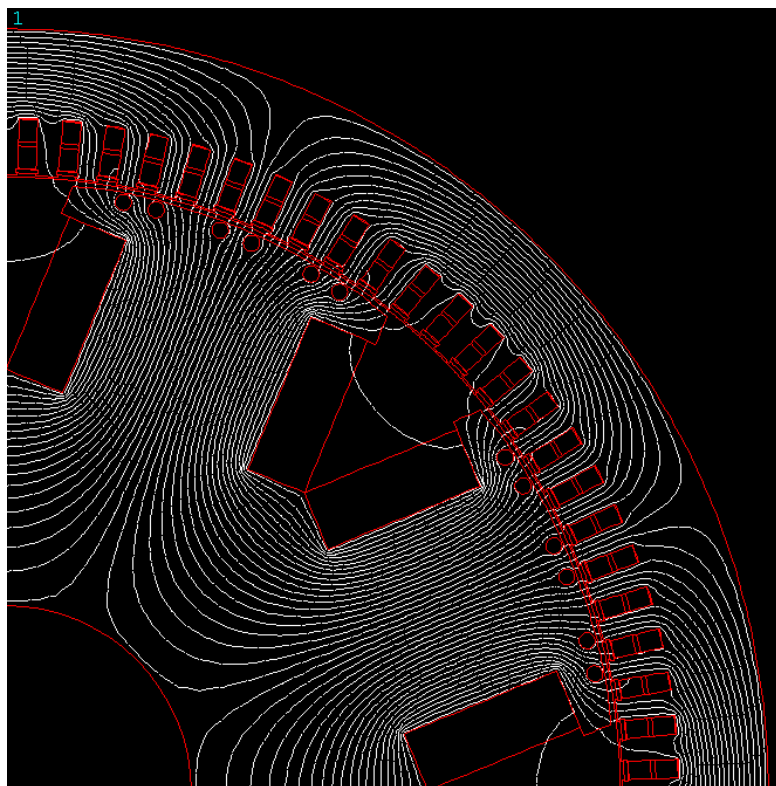
Proudové hustoty vodičů:

$$jsu = \frac{i2s}{ppv \cdot ppd} \cdot \sqrt{3} \quad [\text{Am}^{-2}], \quad (9)$$

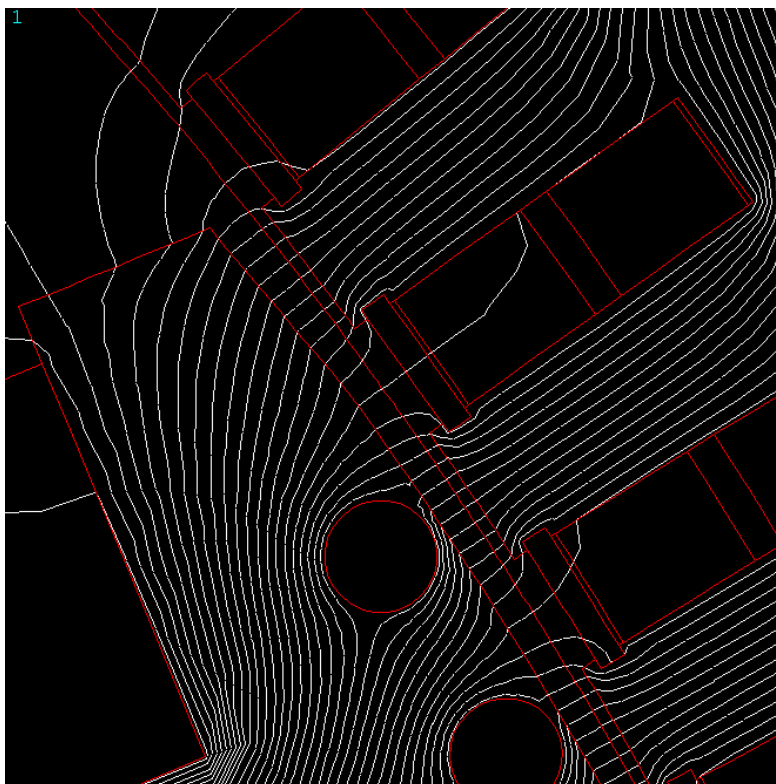
$$jsv = -\frac{i2s}{ppv \cdot ppd} \cdot 0,5 \cdot \sqrt{3} \quad [\text{Am}^{-2}], \quad (10)$$

$$jsw = -\frac{i2s}{ppv \cdot ppd} \cdot 0,5 \cdot \sqrt{3} \quad [\text{Am}^{-2}], \quad (11)$$

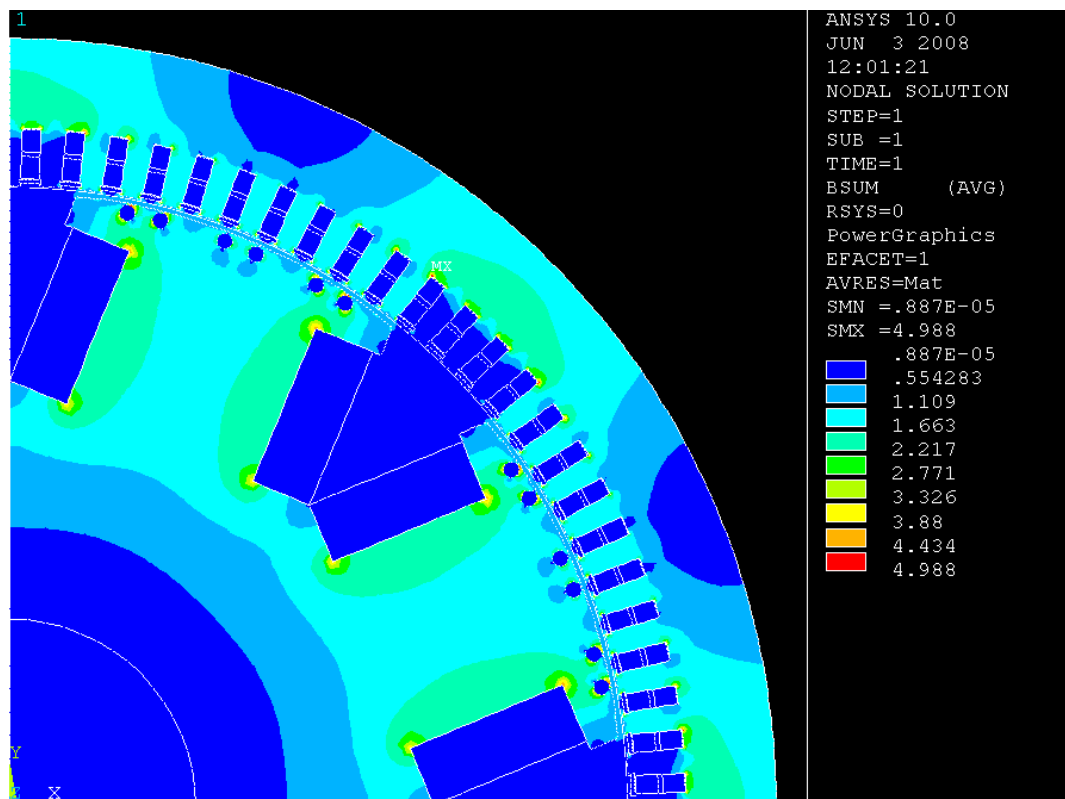
Na následujících obrázcích je zachycen průběh siločar (Obr. 26 a Obr. 27) a magnetické indukce (Obr. 28, Obr. 29 a Obr. 30).



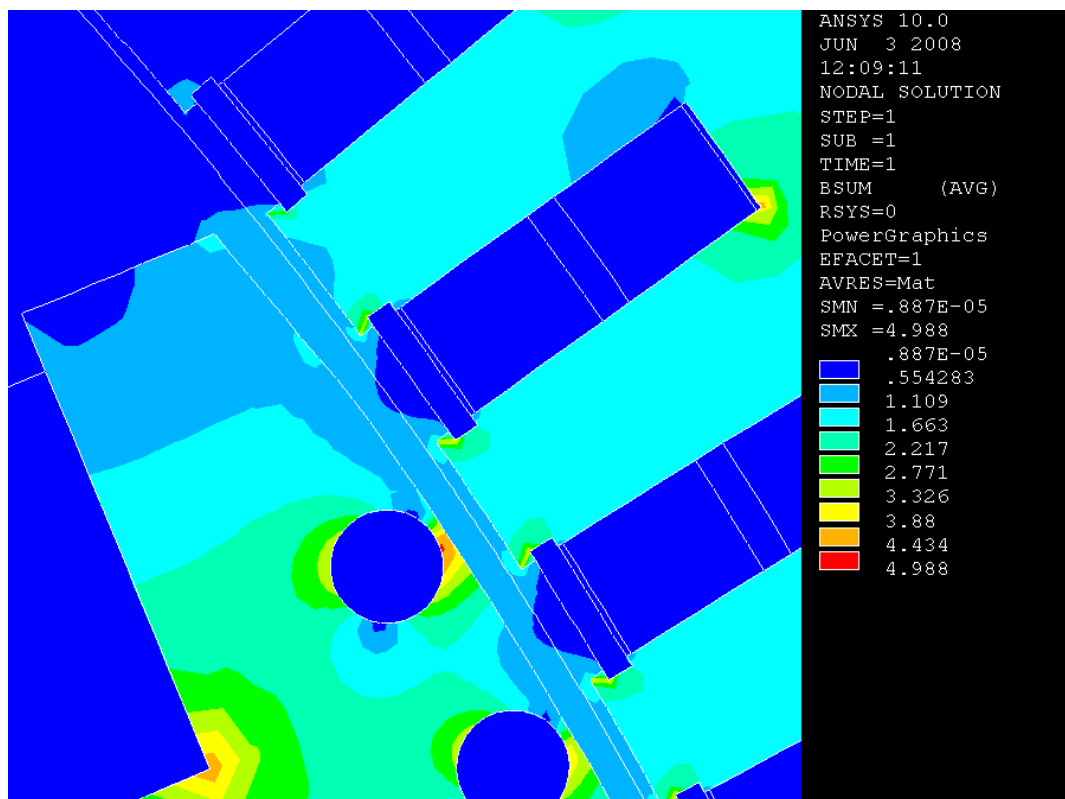
*Obr. 26: Průběh siločar*



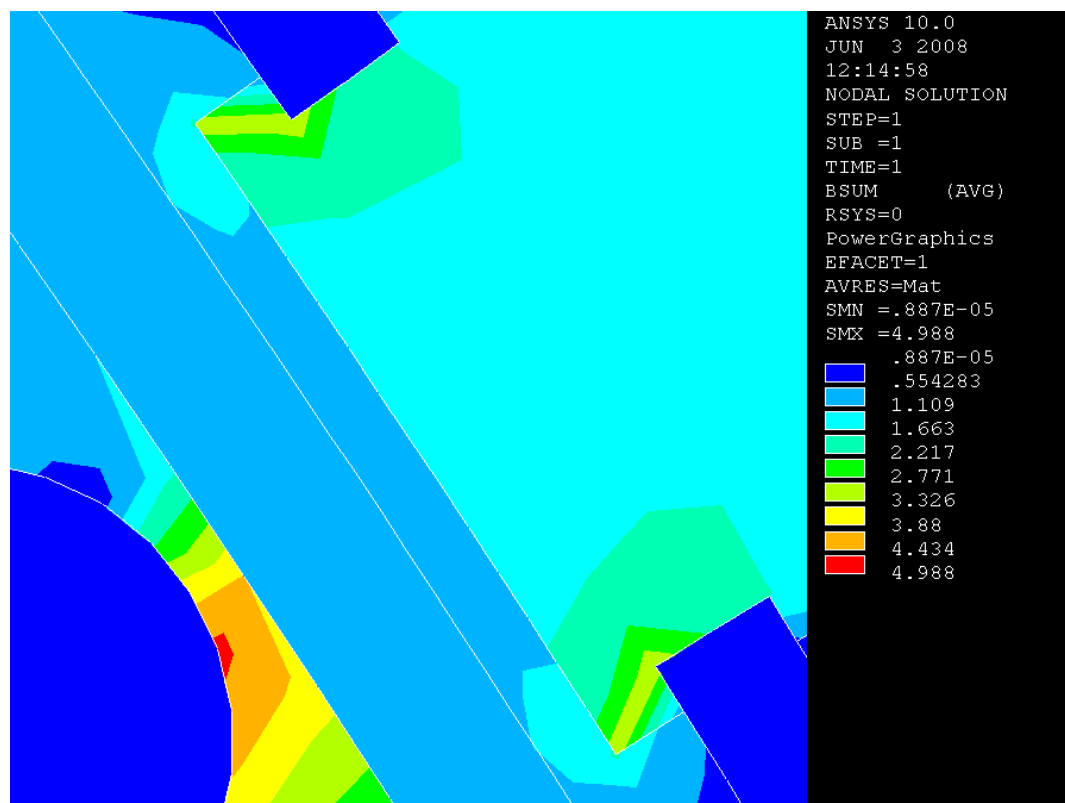
*Obr. 27: Průběh siločar – detail pólu*



Obr. 28: Magnetická indukce



Obr. 29: Magnetická indukce – detail pólu



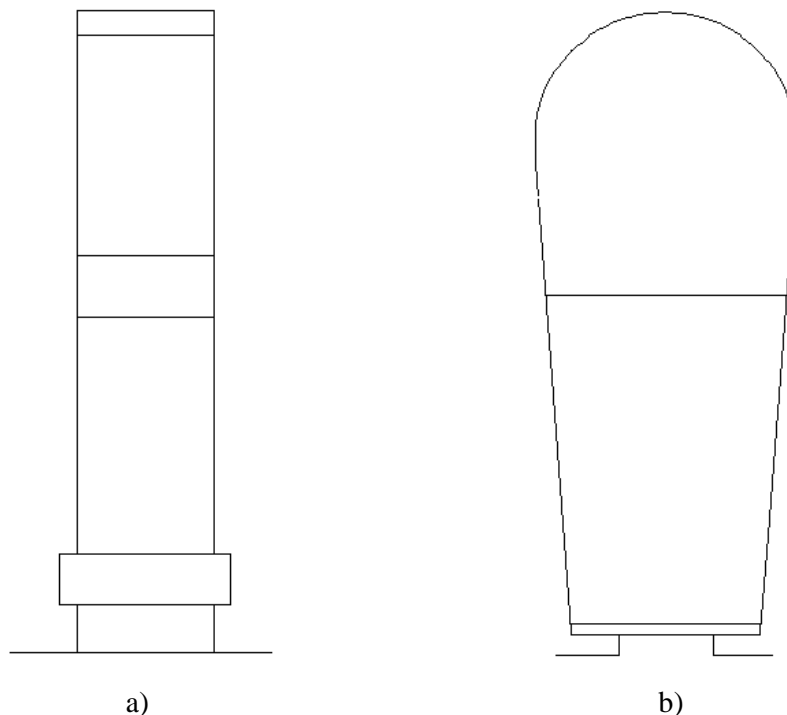
Obr. 30: Magnetická indukce – detail vzduchové mezery

## 7 OBMĚNA PROGRAMU – KRUHOVÉ VINUTÍ

Výpočtový program je navržen pro satorové vinutí vyrobené z pásů obdélníkového průřezu. Pro použití vodičů kruhového průřezu je potřeba pozměnit geometrii stroje (konkrétně tvar drážky). Použitím jiného tvaru se změní činitel plnění drážky a je třeba jej přepočítat.

### 7.1 Tvar drážky

Na následujícím obrázku (Obr. 31) jsou zobrazené drážky satoru při použití a) vodičů obdélníkového průřezu, b) vodičů kruhového průřezu.



Obr. 31: Tvary drážek

## 7.2 Činitel plnění drážky

Zuby jsou po magnetické stránce nejvíce zatíženým místem magnetického obvodu, proto je třeba volit takové rozměry drážek, které umožňují umístění nutného počtu vodičů vinutí a izolace v co nejmenším prostoru. Využití prostoru drážky pro umístění vodičů se vyjadřuje *činitelem plnění drážky*  $k_{dr}$ , který udává poměr celkového průřezu všech vodičů v drážce k ploše drážky  $S_d$ :

$$k_{dr} = \frac{S_v \cdot V_d \cdot n_p}{S_d} \quad [-], \quad (12)$$

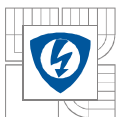
kde  $S_v$  je průřez dílčího vodiče,  $V_d$  počet vodičů v drážce a  $n_p$  počet paralelních vodičů (drátů) tvořící jeden vodič.

V programu je použita následující obměna předchozí rovnice:

$$cfils = \frac{pdd}{2} \cdot \frac{sdrs}{sc} \quad [-], \quad (13)$$

kde  $cfils$  je činitel plnění drážky (označován také jako činitel plnění cívky statoru),  $sdrs$  průřez drátu statoru a  $sc$  průřez strany cívky statoru (respektive plocha drážky).

Ve strojích, jejichž vinutí je vyrobeno z pásů obdélníkového průřezu, může být činitel vypočítán dostatečně přesně, protože při návrhu je přesně určena poloha každého vodiče v drážce.



### 7.3 Parametrický model

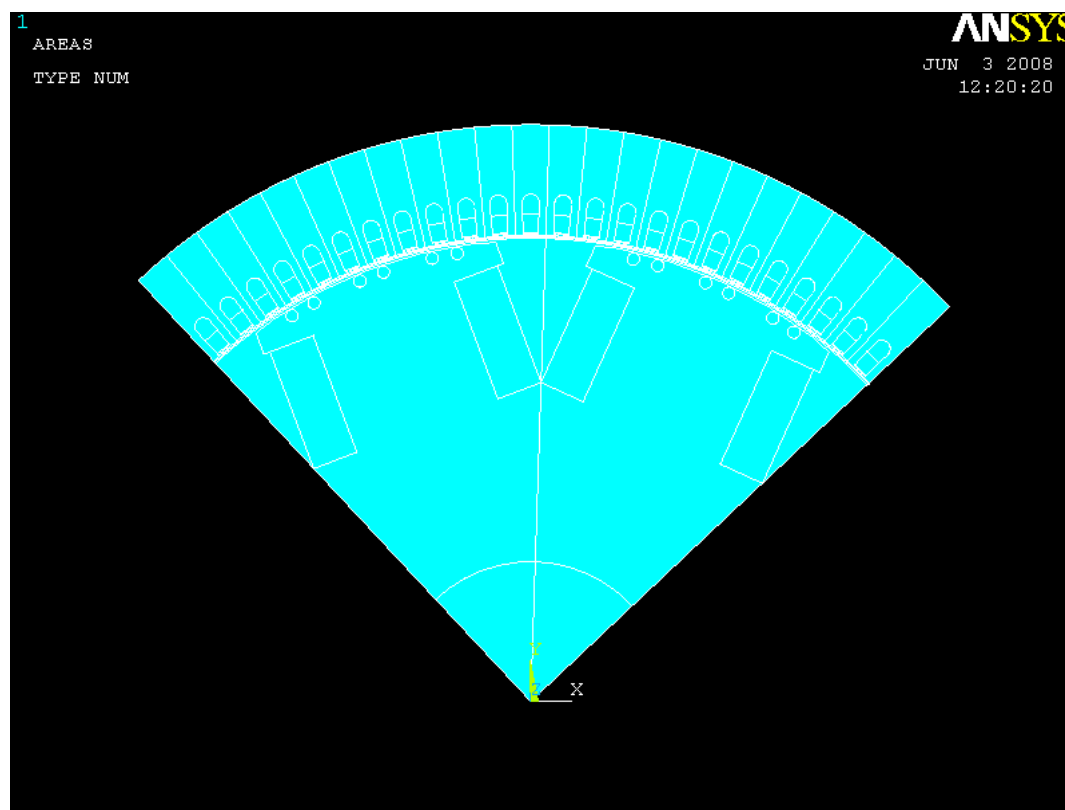
Makra programu pracují obdobně jako makra použitá pro stroj s profilovým vinutím (viz kapitola 6.2).

#### 7.3.1 Makro inputdata.mac

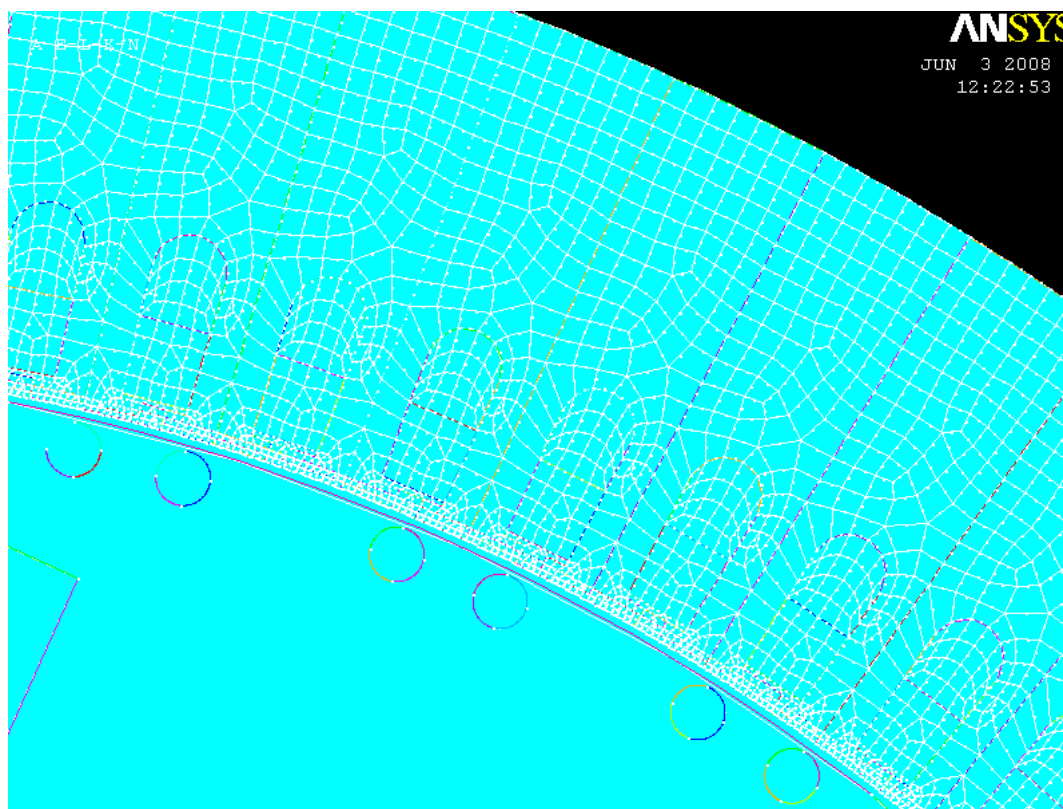
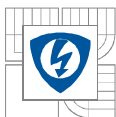
Makro inputdata.mac rovněž uloží používané parametry, z nichž některé jsou samozřejmě jiné kvůli vytvoření odlišné geometrie.

#### 7.3.2 Makro modeling&meshing1.mac

Výsledek tohoto makra je uvedený na Obr. 32 a Obr. 33:



*Obr. 32: Stav ke konci makra*



Obr. 33: MESH statoru

## 7.4 Porovnání verzí programu

### Výpočet průřezu strany cívky statoru

a) Vodiče obdélníkového průřezu

$$sc = 0.5 \cdot (h_0 + h_1 + h_2 - h_k - 2 \cdot v_l - m_{v1}) \cdot b_0$$

b) Vodiče kruhového průřezu

$$sc = (\pi/2) \cdot (b_2/2)^2 + (1/2) \cdot (b_1 + b_2) \cdot (h_2 - b_2/2) - b_1 \cdot h_{zk}$$

### Geometrie statoru – pro příklad vytváření dna drážky (viz Obr. 19)

a) Vodiče obdélníkového průřezu (Obr. 34)

! ---keypoints tvořící dno drážky statoru---

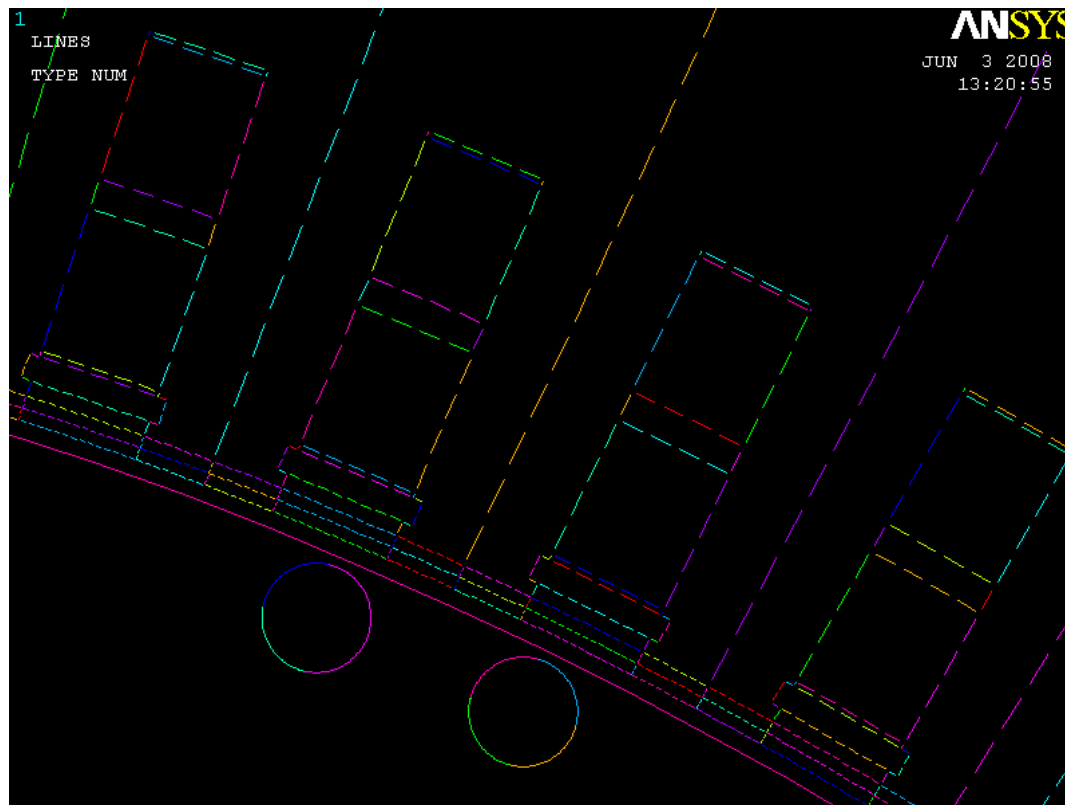
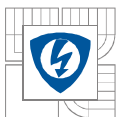
k,5019,b0/2,sqrt(vnips\*\*2-(b0/2)\*\*2)+deltahk+hk+(h0+h1+h2-hk-deltahk)/2+mvl/2

k,5020,-b0/2,sqrt(vnips\*\*2-(b0/2)\*\*2)+deltahk+hk+(h0+h1+h2-hk-deltahk)/2+mvl/2

k,5021,b0/2,sqrt(vnips\*\*2-(b0/2)\*\*2)+h0+h1+h2-vl

k,5022,-b0/2,sqrt(vnips\*\*2-(b0/2)\*\*2)+h0+h1+h2-vl

! --vytvoreni plochy statorovych civek dna drážky-areas ---  
a,5019,5020,5022,5021



Obr. 34: Statorové drážky – profilové vinutí

b) Vodiče kruhového průřezu (Obr. 35)

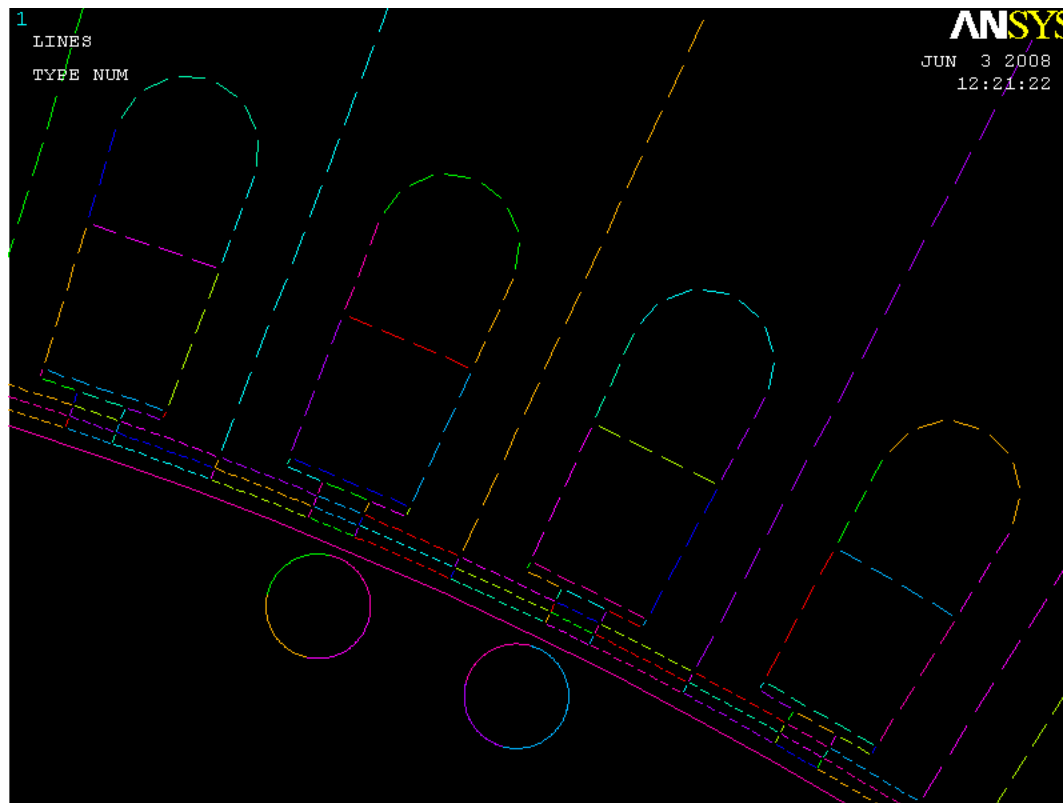
```
! ---keypoints tvorici dno drážky statoru---
k,5012,-b2/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+h0+(h2-b2/2)
k,5013,b2/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+h0+(h2-b2/2)
k,5014,0,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+h2+h0
!mezivlozka
xsou=sqrt(((h2-hizk-
b2/2)*b1*(b1+b2)+((pi*(b2/2)**2)+b2*(h2-
-hizk-b2/2))*(b2-b1))/(2*(h2-hizk-b2/2)))
ysou=((pi*(b2/2)**2)+(h2-hizk-
b2/2)*(xsou+b2))/(b1+b2+2*xsou)
k,5015,-xsou/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+h0+ysou
k,5016,xsou/2,sqrt(vnips**2-(b0/2)**2)+h0+ysou

! ---telo dna drážky-lines---
lstr,5015,5016
larc,5012,5013,5014,b2/2
lstr,5015,5012
lstr,5016,5013

! ---vytvoreni plochy statorovych civek dna drážky-areas---
csys,1
lsel,s,loc,x,vnips+h0+hizk+ysou-0.001,vnips+h0+h2!
al,all
csys,0

kdele,5014 ! smazani nepotrebného kpointu
```





Obr. 35: Statorové drážky – vsypávané vinutí

## 8 ZÁVĚR

V souvislosti s vývojem nové řady nízkonapěťových synchronních generátorů, jejichž statorové vinutí je tvořeno kruhovými vodiči, vyvstala potřeba simulace magnetického pole těchto strojů.

Rozdílná geometrie statorové drážky je patrná z obrázku tvarů drážek (Obr. 31). Drážka pro vodiče obdélníkového průřezu je vytvořena pravoúhlými oblastmi. Dno drážky pro vodiče průřezu kruhového má tvar půlkruhu, jehož krajní body jsou úsečkami spojeny s krajními body protilehlé strany drážky.

Porovnejme výhody a nevýhody vinutí kruhového a obdélníkového průřezu:

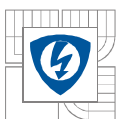
### Kruhové – vsypávané vinutí

Náklady na výrobu vinutí s použitím kruhových vodičů jsou menší, avšak využitelnost drážky je nižší navíc s nedefinovaným napětím mezi závit. Průměr drátu zpravidla nepřevyšuje 1,8 mm, potřebného průřezu vodiče se dosahuje použitím několika dílčích paralelních vodičů.

Činitel plnění drážky dosahuje menších hodnot, to je dáno většími prostory mezi vodiči, které na sebe kvůli svému kruhovému průřezu nemohou těsně doléhat tak, jak je tomu u vodičů obdélníkového průřezu.

### Profilové – obdélníkového průřezu

Vinutí z profilových drátů prochází složitějšími technologickými operacemi než vinutí sestavené z kruhových drátů, ale je zde dosaženo většího využití drážky s přesně definovaným



napětím mezi závitů. Technologickým zpracováním vodičů úměrně roste jejich cena. Cívky se navíjejí na tvarovacích šablonách a ještě před uložením do drážek se jim dává konečný tvar a úprava.

*Činitel plnění drážky* je oproti kruhovým vodičům větší. Lze jej vypočítat velmi přesně, protože při návrhu je přesně určena poloha každého vodiče v drážce.

Vinutí pro vodiče kruhového průřezu je oproti vinutí z profilových vodičů výhodnější u nízkonapěťových strojů, neboť je pro ně charakteristická menší velikost drážky i statorového paketu. Uložení kruhových vodičů do těchto drážek je snazší a efektivnější.

Makro pro výpočet průběhu magnetického pole v příčném řezu stroje se statorovým vinutím z vodičů kruhového průřezu je již vytvořeno, pouze je třeba jej odladit. Ve stávajícím programu dochází k vytvoření geometrie stroje a k přiřazení příslušných materiálů, ale není zcela vyřešena problematika tvorby MESHe a následného výpočtu magnetického pole. Z důvodu časové náročnosti nebylo možné odladit stávající program s aplikací vodičů kruhového průřezu až po výpočet rozložení magnetického pole, což by mohlo být tématem semestrálního projektu 1.



## LITERATURA

- [1] MARK, A. J. *Trends in Finite Element Analysis*.
- [2] KOCMAN, K. *Elektrické stroje a přístroje*.
- [3] FETTER, F. *Přehled silnoprůdové elektrotechniky I*, SNTL, Praha 1957.
- [4] DĚDEK, L., DĚDKOVÁ, J. *Elektromagnetismus*, VUTIUM, Brno 2000.
- [5] ONDRŮŠEK, Č. *Elektrické stroje*.
- [6] AUBRECHT V. *Numerické řešení polí v elektrotechnice*.
- [7] KOPYLOV, I.P. *Stavba elektrických strojů*, Praha 1988 (přeloženo z ruského originálu *Projektirovaniye elektricheskych mashin*, Energija v Moskvě).
- [8] SKALKA M., BOK R., ONDRŮŠEK, Č. *Rozložení magnetického pole v elektrických strojích*.
- [9] ODVÁŘKA, E. *Parametrický výpočetní model synchronního generátoru v prostředí programu ANSYS*, Drásov 2007.
- [10] VÁVRA, Z. *Stavba elektrických strojů a přístrojů*.
- [11] MATOUŠEK, A. *Výroba elektrické energie*.
- [12] VOLF, T. *Počítačová simulace magnetického pole ve 2D*.
- [13] Manuály ANSYS.
- [14] Non-Oriented Electrical Steel, Acroni.
- [15] <http://www.techcorp.cz> [ze dne 15.10.2007]
- [16] <http://www.elektrorevue.cz> [ze dne 9.11.2007]
- [17] <http://ansys.net> [ze dne 2.2.2008]
- [18] <http://fast10.vsb.cz/ansys> [ze dne 21.5.2008]